



Universidad de
Oviedo



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN.

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA INDUSTRIAL**

ÁREA DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

TÍTULO DEL TRABAJO/DOCUMENTO:

**“ESTUDIO DE ANÁLISIS Y UNIONES ATORNILLADAS DE ALTA
RESISTENCIA PARA SU UTILIZACIÓN EN EMPARRILLADOS
METÁLICOS”**

**D. APELLIDOS, Nombre: CHEDA ABELLA, Héctor Rodrigo
TUTOR: D. Juan José Del Coz Díaz**

FECHA: julio de 2019

Índice

| | |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN | 5 |
| 1.1. Agradecimientos | 5 |
| 1.2. Objeto y alcance del proyecto | 6 |
| 1.3. Antecedentes | 8 |
| 1.3.1. Normativa empleada | 8 |
| 1.4. Organización del trabajo | 8 |
| CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA | 10 |
| 2.1. Introducción | 10 |
| 2.2. Chapas | 11 |
| 2.3. Tornillos hexagonales con tuercas hexagonales | 11 |
| 2.4. Método de cálculo del Eurocódigo 3 | 14 |
| 2.4.1. Resistencia a aplastamiento | 15 |
| 2.4.2. Resistencia a cortante | 16 |
| 2.4.2.1. Comprobación para aplastamiento, a cortante | 17 |
| CAPÍTULO 3: MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS | 18 |
| 3.1. Introducción | 18 |
| 3.2. Etapas en la aplicación de los MEF | 19 |
| 3.3. Pasos previos | 20 |
| 3.4. Fase 1: Preprocesado | 24 |
| 3.4.1. Modelización | 24 |
| 3.4.1.1. Contacto | 24 |
| 3.4.1.2. Elección del tipo de elemento | 28 |
| 3.4.1.3. Materiales | 35 |
| 3.4.2. Discretización | 35 |
| 3.5. Fase 2: Cálculos | 38 |
| 3.5.1. Tipos de análisis | 39 |
| 3.5.1.1. No linealidades | 39 |
| 3.5.2. Cargas aplicadas y condiciones de contorno | 40 |
| 3.5.2.1. Cargas aplicadas | 41 |
| 3.5.2.2. Condiciones de contorno | 42 |
| 3.5.2.3. Solución | 42 |
| 3.6. Fase 3: Postprocesado | 43 |
| CAPÍTULO 4: ESTUDIO DE LA UNIÓN TORNILLO-CHAPA | 44 |
| 4.1. Gráfica fuerza – deformación teórica | 44 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.2. Modelos resultantes en el programa de elementos finitos | 45 |
| 4.2.1. Modelo de prueba | 45 |
| 4.2.2. Modelo real obtenido por el criterio de aplastamiento..... | 46 |
| 4.3. Resultados del modelo por aplastamiento..... | 48 |
| 4.3.1. Deformación máxima a aplastamiento..... | 48 |
| 4.3.1.1. Deformación máxima del conjunto | 48 |
| 4.3.1.2. Deformación máxima en las chapas | 49 |
| 4.3.2. Tensión de Von Mises..... | 51 |
| 4.3.2.1. Tensión de Von Mises del conjunto | 51 |
| 4.3.2.2. Tensión de Von Mises en las chapas | 52 |
| 4.3.3. Tensiones normales..... | 55 |
| 4.3.3.1. Tensión normal del conjunto | 55 |
| 4.3.3.2. Tensión normal en las chapas | 56 |
| CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES | 58 |
| 5.1. Programa de cálculo | 58 |
| 5.2. Método de cálculo propuesto por el Eurocódigo 3 | 58 |
| 5.3. Comportamiento de la unión atornillada | 58 |
| 5.3.1. Modos de fallo | 58 |
| 5.3.2. Comparativas numérica y experimental..... | 60 |
| 5.4. Futuras líneas de investigación | 63 |
| CAPÍTULO 6: PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO..... | 64 |
| 6.1. Planificación y programación | 64 |
| 6.2. Diagrama de Gantt..... | 64 |
| CAPÍTULO 7: PRESUPUESTO | 66 |
| 7.1. Introducción..... | 66 |
| 7.2. Cálculo de costes..... | 66 |
| 7.2.1. Hardware | 67 |
| 7.2.2. Software..... | 67 |
| 7.2.3. Gastos de personal | 68 |
| 7.2.4. Material fungible | 68 |
| 7.2.5. Otros gastos | 68 |
| 7.3. Coste total del proyecto | 69 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 70 |
| ANEXOS | 71 |

Índice de Figuras

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Entreplanta de una nave | 6 |
| Figura 2. Elementos de la unión chapa-tornillo | 10 |
| Figura 3. Chapas usadas en el modelo | 11 |
| Figura 4. Tornillo hexagonal tipo DIN 931..... | 12 |
| Figura 5. Tuerca hexagonal tipo 6923 | 13 |
| Figura 6. Separación entre elementos de fijación | 14 |
| Figura 7. Criterio de resistencia por aplastamiento y a cortante..... | 17 |
| Figura 8. Esquema de las etapas seguidas en el MEF | 20 |
| Figura 9. Modelo de la unión chapa-tornillo..... | 21 |
| Figura 10. Mallado final del modelo simplificado | 22 |
| Figura 11. Vista en detalle de la malla refinada en parte de las dos chapas | 22 |
| Figura 12. Pretensado tornillo en el modelo | 23 |
| Figura 13. Contacto parte de abajo tornillo con chapa 1 | 25 |
| Figura 14. Contacto vástago tornillo-tuerca con chapa 1..... | 26 |
| Figura 15. Contacto vástago tornillo-tuerca con chapa 2..... | 26 |
| Figura 16. Contacto parte de abajo tuerca con chapa 2..... | 27 |
| Figura 17. Contacto chapa 1 con chapa 2..... | 27 |
| Figura 18. Contacto SOLID 187 | 29 |
| Figura 19. Contacto superficie - superficie..... | 31 |
| Figura 20. Elemento COMBIN 14 | 33 |
| Figura 21. Elemento PRETS 179 | 34 |
| Figura 22. Mallado del contacto nº1 | 36 |
| Figura 23. Mallado del contacto nº2 | 37 |
| Figura 24. Mallado del contacto nº3 | 37 |
| Figura 25. Mallado del contacto nº4 | 38 |
| Figura 26. Mallado del contacto nº5 | 38 |
| Figura 27. Primera restricción: soporte fijado en la chapa 1..... | 41 |
| Figura 28. Segunda restricción: desplazamiento en la chapa 2..... | 41 |
| Figura 29. Aplicación progresiva de la carga en varios pasos | 42 |
| Figura 30. Diagrama fuerza - deformación teórica del proyecto | 44 |
| Figura 31. Gráfica fuerza - deformación del modelo de prueba | 46 |
| Figura 32. Gráfica de los valores del modelo real obtenidos por aplastamiento..... | 47 |
| Figura 33. Deformación máxima del conjunto por aplastamiento | 48 |
| Figura 34. Otra perspectiva de la deformación total del conjunto por aplastamiento..... | 48 |
| Figura 35. Deformación máxima en las chapas por aplastamiento | 49 |
| Figura 36. Deformación chapas parte superior chapa1 por aplastamiento | 49 |
| Figura 37. Deformación chapas parte inferior chapa1 por aplastamiento..... | 50 |
| Figura 38. Deformación chapas parte superior chapa2 por aplastamiento | 50 |
| Figura 39. Deformación chapas parte inferior chapa2 por aplastamiento..... | 51 |
| Figura 40. Tensión Von Mises conjunto por aplastamiento..... | 51 |
| Figura 41. Otra perspectiva de la tensión de Von Mises del conjunto por aplastamiento..... | 52 |
| Figura 42. Tensión Von Mises parte superior chapas por aplastamiento..... | 52 |
| Figura 43. Tensión Von Mises parte superior chapa1 por aplastamiento | 53 |
| Figura 44. Tensión Von Mises parte inferior chapa1 por aplastamiento..... | 53 |
| Figura 45. Tensión Von Mises parte superior chapa2 por aplastamiento | 54 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 46. Tensión Von Mises parte inferior chapa2 por aplastamiento | 54 |
| Figura 47. Tensión normal del conjunto por aplastamiento | 55 |
| Figura 48. Otra perspectiva de la tensión normal del conjunto por aplastamiento | 55 |
| Figura 49. Tensión normal en las chapas por aplastamiento | 56 |
| Figura 50. Tensión normal en la chapa1 por aplastamiento | 56 |
| Figura 51. Tensión normal en la chapa2 por aplastamiento | 57 |
| Figura 52. Resultado de un ensayo de laboratorio (arriba) y en el programa de elementos finitos mediante la tensión de Von Mises (abajo) para un fallo por aplastamiento | 59 |
| Figura 53. Resultado de un ensayo de laboratorio (arriba) y en el programa de elementos finitos mediante la tensión de Von Mises (abajo) para un fallo por área neta | 60 |
| Figura 54. Comportamiento de la unión atornillada final | 61 |
| Figura 55. Inciso penalización del EC3 | 61 |
| Figura 56. Posible solución para asegurarse el problema de contacto entre chapas | 61 |
| Figura 57. Imagen entre el diámetro del perforado y el diámetro del vástago | 62 |
| Figura 58. Detalle de la chapa del soporte fijado en el modelo | 62 |
| Figura 59. Diagramas de Gantt del TFM | 65 |

Índice de tablas

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Símbolos para calcular las ecuaciones propuestas en el EC3 | 14 |
| Tabla 2. Datos numéricos de los parámetros a trabajar | 14 |
| Tabla 3. Condiciones para la correcta obtención de e_1 y e_2 | 15 |
| Tabla 4. Valores resultantes de la fuerza de aplastamiento teórica | 16 |
| Tabla 5. Condición para la unión de solape mínimo con una fila de tornillos | 16 |
| Tabla 6. Valores resultantes de la resistencia a cortante teórica | 17 |
| Tabla 7. Comprobación de si se cumple el primer criterio de aplastamiento y cortante | 17 |
| Tabla 8. Comprobación de si se cumple el segundo criterio de aplastamiento y cortante | 17 |
| Tabla 9. Resultado de la fuerza de pretensado para esta métrica | 23 |
| Tabla 10. Resumen del elemento SOLID 187 | 30 |
| Tabla 11. Resumen elemento CONTA 174 | 31 |
| Tabla 12. Resumen elemento TARGE 170 | 32 |
| Tabla 13. Resumen elemento COMBIN 14 | 33 |
| Tabla 14. Resumen elemento PRETS 179 | 34 |
| Tabla 15. Propiedades del tornillo de alta resistencia | 35 |
| Tabla 16. Valores resultantes del modelo de prueba | 45 |
| Tabla 17. Valores resultantes del modelo real obtenido por aplastamiento | 46 |
| Tabla 18. Coste por parte del hardware empleado | 67 |
| Tabla 19. Coste por parte del software empleado | 68 |
| Tabla 20. Coste por parte del personal | 68 |
| Tabla 21. Coste por material fungible | 68 |
| Tabla 22. Coste total del proyecto | 69 |

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Agradecimientos

En primer lugar, a mis compañeras/os con los que he compartido todo este rato en prácticas en la empresa (Javier, Xana, Montse, Diego...) siendo totalmente receptivos conmigo, abiertos a consultar cualquier tipo de inquietud en relación al trabajo cotidiano en la empresa. No quiero olvidarme tampoco del papel que ha desempeñado el tutor de la empresa (David Montes) abierto a resolver cualquier duda del presente TFM y de darme consejos para el futuro.

En segundo lugar, las personas que coincidieron conmigo en mi vida diaria en Gijón. Por un lado, en apartamentos Jovellanos durante casi dos años y medio: Antonio, Julián, Alberto, Pérez, Katia, Fran (siendo estos tres últimos son los miembros que forman parte del negocio), etc. Por otro lado, a Mónica Rodríguez por ayudarme a seguir creciendo como persona y fortaleciendo mis aspectos a mejorar a nivel profesional/social. También a Alejandro Álvarez por ayudarme a superar (y apoyándome) la asignatura más complicada del máster.

En tercer lugar, a mis compañeras/os con los que coincidí en el máster: Óscar, Pablo, Mario, Darío, Verónica Carreira, Nacho, María, Verónica Pandal, Carmen, Sergio, Cristina, Cristóbal...por supuesto, a mi tutor por parte de la universidad (Juanjo De Coz) por los consejos que me ha dado y su pasión por resolver dudas o explicar conceptos nuevos para mí.

Y por último (lo más importante), a mi entorno en Galicia: mis padres, mi hermana, mi novia y mis amigos que tanto me apoyaron para dar el salto de Galicia a Asturias saliendo de la zona de confort.

1.2. Objeto y alcance del proyecto

El presente proyecto trata de describir el desarrollo de un modelo numérico para simular fielmente el comportamiento de la unión atornillada entre dos chapas. Dicho modelo simplificado contiene: dos chapas, un tornillo y una tuerca de métrica M12.



Figura 1. Entreplanta de una nave

Este tipo de uniones atornilladas constituye y es habitual en la estructura metálica de una entreplanta en naves industriales (véase figura 1) por las ventajas que presenta frente a las uniones mediante soldadura, tales como:

- Control de obra menos estricto.
- Operarios menos cualificados.
- Son desmontables.
- No existen tensiones residuales.
- Existe menor riesgo de rotura frágil.
- Mayor rendimiento de montaje en obra.

El objetivo del proyecto consiste en analizar un problema muy frecuente en las estructuras atornilladas universales (en cualquier empresa): la deformación teórica de las uniones atornilladas sale mucho menor respecto a la deformación resultante en la realidad.

En este proyecto, se va a partir de la hipótesis de analizar el deslizamiento de la unión (del vástago del tornillo y el agujero por separado) mediante dos modos: la primera por aplastamiento, y la segunda a cortante.

Para lograr los objetivos planteados se parte de un modelo inicial de barras de la nave y, mediante el programa de cálculo *Solid Edge ST10*, se obtiene un predimensionado de las chapas y el tornillo. En base a dicho predimensionado, y siguiendo las indicaciones del Eurocódigo 3, se diseña la

geometría de la unión. Posteriormente, mediante un programa de análisis mediante elementos finitos, se procederá a la modelización tridimensional completa de la unión, estudiándose las distribuciones de tensiones en los elementos de unión, los desplazamientos máximos de las chapas y las presiones en el contacto chapa-tornillo, para cada tipología.

Finalmente, se compararán los resultados obtenidos mediante el método que propone el EC3 con los obtenidos mediante el MEF.

Para llevar a cabo este proyecto se ha utilizado el programa *ANSYS University Intermediate*, en su versión 18.2, así como el entorno de simulación *ANSYS-Workbench* incluido en el paquete denominado *Ansys Productivity Pack ED*. La geometría se ha desarrollado mediante un programa de diseño paramétrico, *ANSYS-Workbench-Modeller*, exportándose después al módulo de *ANSYS-Workbench-Simulation* y, posteriormente dicho modelo es exportado desde dicho entorno de simulación, importándose desde el programa ANSYS Clásico.

El entorno denominado *ANSYS-Workbench*, incluido en el paquete *Ansys Productivity Pack ED*, constituye una herramienta de simulación de primer nivel para ofrecer al Ingeniero una validación rápida de las características del producto durante el proceso de desarrollo. Las entradas y salidas están parametrizadas por defecto, e interactúa y controla los parámetros de la mayoría de los sistemas CAD 3D y DesignModeler. De igual modo puede ser dirigido por otros módulos de simulación y optimización, tales como *DesignXplorer*. De este modo, la herramienta pretende conseguir una automatización basada en el conocimiento mediante una instructiva GUI (Graphical User Interface) dando acceso a más de 40 años de experiencia de simulación numérica.

ANSYS es un programa de software para el análisis por elementos finitos desarrollado para ordenadores personales y estaciones de trabajo por SWANSON ANALYSIS SYSTEM, INC. (SASI), siendo uno de los programas de este tipo más universalmente utilizado y reconocido.

Ambos programas se encuentran disponibles en los servidores de cálculo del Área de Ingeniería de la Construcción del Departamento de Construcción e Ingeniería de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón.

El MEF es un método de análisis que puede ser utilizado por el diseñador de elementos estructurales como una alternativa a los métodos de cálculo y diseños tradicionales (métodos analíticos, normativas, catálogos, etc) o bien para contrastar los resultados obtenidos por ellos.

El uso de este método presenta innumerables ventajas de orden económico y práctico: por una parte, a la posibilidad de ver cómo se comporta una estructura aún no realizada con toda la información que eso conlleva (simulación), y por otra, el bajo coste (relativo) que supone esta operación.

1.3. Antecedentes

Uno de los mayores inconvenientes en el cálculo, análisis y modelización de elementos de unión estriba en el conocimiento de su comportamiento real.

La propuesta europea del Eurocódigo 3 en estructuras metálicas, establece los criterios básicos de análisis que debe llevar a cabo el proyectista, al objeto de evaluar el comportamiento real de una estructura; en los cuales se exige el conocimiento del comportamiento real de las conexiones, teniendo en cuenta en dicho análisis el comportamiento real de las conexiones entre los diferentes elementos que componen la estructura.

No obstante, la complejidad inherente del procedimiento que permite conocer el comportamiento entre conexiones, obliga a adoptar valores e hipótesis muy simplificadas, tales como uniones perfectamente rígidas o flexibles, perfectamente lineales, etc. cuyo comportamiento dista, en muchas ocasiones, del real; con el consiguiente perjuicio en la economía de la construcción.

Resumiendo, por tanto, los puntos expuestos anteriormente, se puede concluir que el interés de la propuesta radica en los puntos siguientes:

- Profundización en los métodos de simulación numérica de elementos estructurales complejos.
- Extrapolación de los resultados a otras tipologías semejantes.
- Sistematización del proceso de análisis.
- Mejoras significativas en el proceso de optimización estructural.
- Mejor comprensión del comportamiento real de los elementos que componen la unión.

1.3.1. Normativa empleada

La normativa empleada en este trabajo fin de máster ha sido la siguiente: la norma UNE-EN 1993-1-8:2013 (del proyecto de estructuras de acero), el EN 1090-2:2006-10 y el Código Técnico de la Edificación.

1.4. Organización del trabajo

En primer lugar, se parte de un modelo inicial de barras de la nave y, mediante el programa de cálculo *Solid Edge ST10*, se obtiene un predimensionado de las chapas y el tornillo.

En segundo lugar, en base al predimensionado anterior y siguiendo las indicaciones del Eurocódigo 3, se diseña la geometría de la unión. En base a este cálculo se adopta inicialmente, para el tornillo que forma parte de la unión, un diámetro normalizado de métrica 12 así como un espesor de la placa de 3mm.

En tercer lugar, se procederá a la modelización tridimensional completa de la unión.

Estudio de análisis y uniones atornilladas de alta resistencia para su utilización en emparrillados industriales

En cuarto lugar, la geometría es exportada al entorno *ANSYS-Workbench-Simulation*, donde se procede al mallado de todos los elementos modelados en el paso anterior, así como a especificar los materiales y propiedades de los pares de contacto entre los elementos constitutivos de la unión.

Finalmente se procede a la definición de cargas y condiciones de contorno, poniendo especial atención en la elección de los distintos parámetros que influirán sobre el proceso de resolución de las ecuaciones, teniendo en cuenta que en este problema se tienen dos no linealidades, por un lado la geométrica, de grandes desplazamientos, y por otra la debida al contacto, de las cuales se dará una explicación en posteriores apartados de esta memoria.

Una vez resuelto el problema, se procederá al post-procesado de resultados, donde se podrá valorar la credibilidad de los valores obtenidos a partir de la observación de los distintos campos de tensiones, presiones y desplazamientos, y teniendo en cuenta, además, los distintos tipos de errores que se pueden cometer o acumular en un análisis no lineal de estas características. Una vez validados estos resultados, éstos se compararán con los calculados mediante el método que propone el EC3 en este tipo de conexiones.

A partir de este momento, todo el trabajo se centrará en el diseño y objeto de estudio en el presente proyecto, que incluye un determinado coeficiente de rozamiento, así como un pretensado en el tornillo que componen la unión.

Una vez realizados todos los análisis se construirá una gráfica comparativa, que muestre la variación de las tensiones en los elementos de unión en función del rozamiento y del pretensado.

CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

2.1. Introducción

Como se ha mencionado anteriormente, el presente TFM trata de estudiar la distribución de tensiones que se producen en la unión chapas-tornillo.

Las cargas aplicadas serán las habituales: pesos propios de los perfiles y pretensado del tornillo.

En la siguiente figura se presenta únicamente la tipología de la unión objeto de estudio:

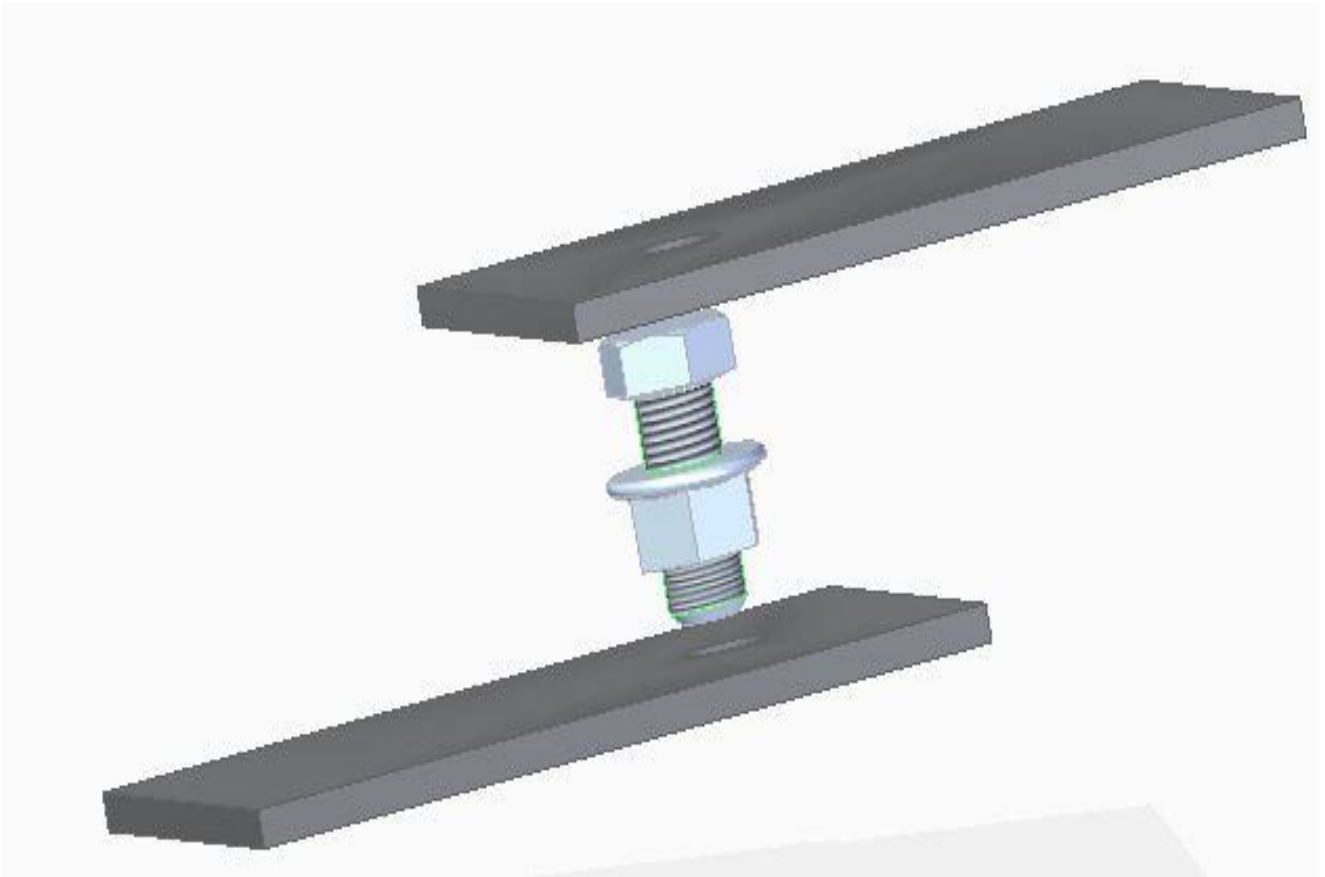


Figura 2. Elementos de la unión chapa-tornillo

2.2. Chapas

Las chapas deben recibir las cargas sometidas tanto del tornillo pretensado como del desplazamiento efectuado en uno de los extremos de las mismas. Para ello se dispone la placa que tiene la función de permitir la unión con el tornillo además de repartir los esfuerzos de manera que las tensiones que en él se originen puedan ser resistidas por el mismo.

Las chapas modelo tienen unas dimensiones de 120x80mm y 3mm de espesor con un agujero, empleando junto con un tornillo y una tuerca (ambos de alta resistencia) de métrica 12.

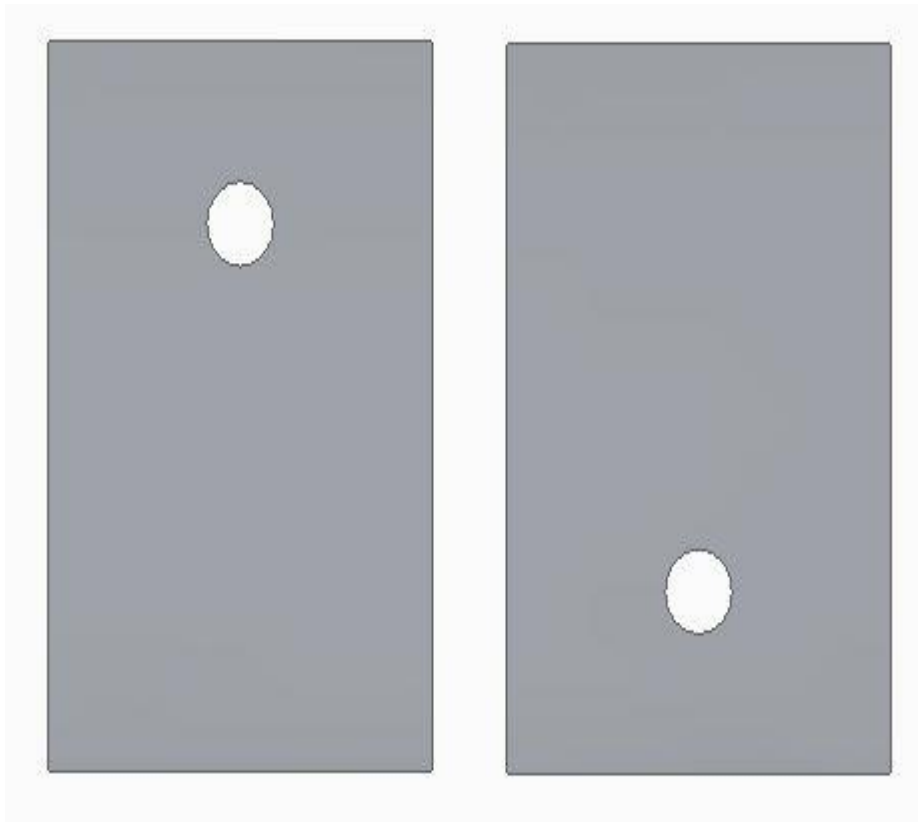


Figura 3. Chapas usadas en el modelo

2.3. Tornillos hexagonales con tuercas hexagonales

El elemento de anclaje seleccionado es un tornillo de tipo DIN 931, de calidad 8.8 y con una longitud de espiga $L = 30$ mm; mientras que la tuerca es del tipo DIN 6923. A continuación, se muestran las características geométricas de ambos componentes:

| d | M6 | M7 | M8 | M10 | M12 | M14 | M16 | M18 | M20 | M22 |
|-------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|
| Pitch | 1 | 1 | 1,25 | 1,5 | 1,75 | 2 | 2 | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| b | ≤125mm | 18 | 20 | 22 | 26 | 30 | 34 | 38 | 42 | 46 |
| | ≤200mm | 24 | 26 | 28 | 32 | 36 | 40 | 44 | 48 | 52 |
| | >200mm | - | - | - | 45 | 49 | 53 | 57 | 61 | 65 |
| k | 4 | 4,8 | 5,3 | 6,4 | 7,5 | 8,8 | 10 | 11,5 | 12,5 | 14 |
| S | 10 | 11 | 13 | 17/16* | 19/18* | 22/21* | 24 | 27 | 30 | 32/34* |
| e | 11,05 | 12,33 | 14,38 | 18,9 | 21,1 | 24,49 | 26,75 | 30,14 | 33,53 | 35,72 |

*Según ISO/

| l* | Peso(weight) 1.000 unid. (kg) | | | | | | | | | |
|-----|-------------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 30 | 8,06 | 12,70 | | | | | | | | |
| 35 | 9,13 | 13,60 | 18,20 | | | | | | | |
| 40 | 10,20 | 15,10 | 20,30 | 35,00 | | | | | | |
| 45 | 11,30 | 16,60 | 22,20 | 38,00 | 53,60 | | | | | |
| 50 | 12,30 | 18,10 | 24,20 | 41,10 | 58,10 | 82,00 | | | | |
| 55 | 13,40 | 19,20 | 25,80 | 43,80 | 62,60 | 88,10 | 115,00 | | | |
| 60 | 14,40 | 21,00 | 27,80 | 46,90 | 67,00 | 94,10 | 123,00 | | | |
| 65 | | 22,50 | 29,80 | 50,00 | 70,30 | 98,80 | 131,00 | 171,00 | 219,00 | |
| 70 | | 24,00 | 31,80 | 53,10 | 74,70 | 105,00 | 139,00 | 181,00 | 231,00 | 281,00 |
| 75 | | | 33,70 | 56,20 | 79,10 | 111,00 | 147,00 | 191,00 | 243,00 | 296,00 |
| 80 | | | 35,70 | 59,30 | 83,60 | 117,00 | 155,00 | 200,00 | 255,00 | 311,00 |
| 85 | | | | 62,40 | 88,10 | 123,00 | 163,00 | 210,00 | 267,00 | 326,00 |
| 90 | | | | 65,50 | 92,40 | 127,00 | 171,00 | 220,00 | 279,00 | 341,00 |
| 95 | | | | 68,60 | 96,80 | 133,00 | 179,00 | 230,00 | 291,00 | 356,00 |
| 100 | | | | 71,70 | 101,00 | 139,00 | 186,00 | 240,00 | 303,00 | 370,00 |
| 110 | | | | | 109,00 | 151,00 | 202,00 | 260,00 | 327,00 | 400,00 |
| 120 | | | | | 118,00 | 164,00 | 218,00 | 280,00 | 251,00 | 430,00 |
| 130 | | | | | | 174,00 | 230,00 | 296,00 | 374,00 | 450,00 |
| 140 | | | | | | 185,00 | 246,00 | 316,00 | 398,00 | 480,00 |
| 150 | | | | | | | 262,00 | 336,00 | 422,00 | 510,00 |
| 160 | | | | | | | 278,00 | 356,00 | 446,00 | 540,00 |
| 170 | | | | | | | | 376,00 | 470,00 | 570,00 |
| 180 | | | | | | | | 396,00 | 494,00 | 600,00 |
| 190 | | | | | | | | | 519,00 | 630,00 |
| 200 | | | | | | | | | 544,00 | 660,00 |
| 220 | | | | | | | | | | 720,00 |

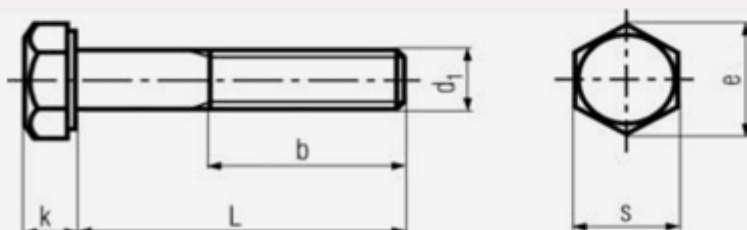


Figura 4. Tornillo hexagonal tipo DIN 931

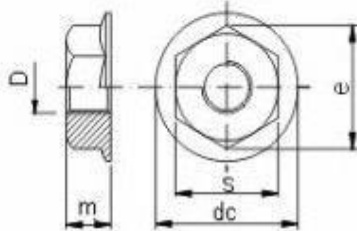
DIN6923

DIN 6923 ; ISO 4161



DIN6923, Hexagon nut with flange

Hexagon Flange Nuts



DIN 6923

ISO 4161

Class: 6/8

| Size | Dimension | dc | s | e | m | kgs/M.pcs |
|------|-----------|----------|----------|-------|----------|-----------|
| | | max.(mm) | min.(mm) | (mm) | max.(mm) | |
| M3 | | 8 | 5.5 | 6.01 | 4 | 0.70 |
| M4 | | 10 | 7 | 7.66 | 4.5 | 1.28 |
| M5 | | 11.8 | 8 | 8.79 | 5 | 1.78 |
| M6 | | 14.2 | 10 | 11.05 | 6 | 3.15 |
| M8 | | 17.9 | 13 | 14.38 | 8 | 7.10 |
| M10 | | 21.8 | 15 | 16.64 | 10 | 11.60 |
| M12 | | 26 | 18 | 20.03 | 12 | 19.20 |
| M14 | | 29.9 | 21 | 23.36 | 14 | 30.00 |
| M16 | | 34.5 | 24 | 26.75 | 16 | 47.00 |
| M20 | | 42.8 | 30 | 32.95 | 20 | |

Figura 5. Tuerca hexagonal tipo 6923

2.4. Método de cálculo del Eurocódigo 3

Antes de entrar en detalle, es necesario describir un conjunto de símbolos que se usarán para despejar las distintas ecuaciones que se efectuarán más adelante (todos los símbolos de distancia son en mm , de superficie en mm^2 y los de resistencia en N/mm^2):

| | |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| d_0 | diámetro del agujero para un tornillo |
| d | diámetro nominal del tornillo |
| e_1 | distancia desde el centro del agujero del elemento de fijación hasta el extremo adyacente de cualquier elemento, medida en la dirección de transferencia de la carga (véase figura 6) |
| e_2 | distancia desde el centro del agujero del elemento de fijación hasta el borde adyacente de cualquier elemento, medida en ángulo recto respecto a la dirección de transferencia de la carga (véase figura 6) |
| p_1 | distancia entre los centros de los elementos de fijación en línea con la dirección de transmisión de la carga (véase figura 6) |
| p_2 | es la distancia entre filas adyacentes de elementos de fijación, medida en dirección perpendicular a la dirección de transmisión de la carga (véase figura 6) |
| t | espesor de la chapa |
| f_u | resistencia última del acero en la chapa |
| f_{ub} | resistencia última del tornillo |
| γ_{M2} | coeficiente parcial de seguridad para uniones atornilladas |
| A_s | área resistente o el área traccionada del tornillo |
| γ_{M7} | coeficiente parcial de seguridad para la resistencia al deslizamiento en estado límite último |
| γ_{M3} | coeficiente parcial de seguridad para la resistencia al deslizamiento en estado límite de servicio |

Tabla 1. Símbolos para calcular las ecuaciones propuestas en el EC3

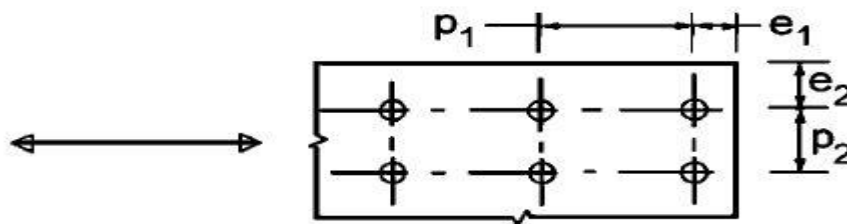


Figura 6. Separación entre elementos de fijación

Tras describir todos los parámetros presentes, sus datos numéricos serían los siguientes:

| d_0 (mm) | d (mm) | e_1 (mm) | e_2 (mm) | t (mm) | f_u (N/mm^2) | f_{ub} (N/mm^2) | A_s (mm^2) |
|------------|----------|------------|------------|----------|--------------------|-----------------------|------------------|
| 14 | 12 | 30 | 40 | 3 | 460 | 800 | 1,25 |

Tabla 2. Datos numéricos de los parámetros a trabajar

Como sólo hay un agujero en el modelo simplificado, para calcular los valores de p_1 y p_2 se usaría las separaciones mínimas que se indican en la tabla 3.3 del EC:

$$p_1 = 2,2d_0$$

$$p_2 = 2,4d_0$$

También, en la tabla 3.3 del EC, los valores de e_1 y e_2 tienen que estar en los siguientes intervalos:

$$1,2d_0 \leq e_1 \leq 4t + 40 \text{ (mm)}$$

$$1,2d_0 \leq e_2 \leq 4t + 40 \text{ (mm)}$$

En la siguiente tabla, se indica los valores tanto mínimos como máximos; y lo más importante: si se cumple la condición.

| | Mínimo | Máximo | Valor | ¿se cumple? |
|------------|--------|--------|-------|-------------|
| e_1 (mm) | 16,8 | 52 | 30 | Sí |
| e_2 (mm) | 16,8 | 52 | 40 | Sí |

Tabla 3. Condiciones para la correcta obtención de e_1 y e_2

Tras describir el conjunto de símbolos y comprobar las correctas obtenciones de e_1 y e_2 , se describirían los procedimientos para hallar primero la resistencia a aplastamiento (tabla 3.4 del EC3) y después la resistencia a deslizamiento (véase apartado 3.9 del EC3).

2.4.1. Resistencia a aplastamiento

Dado que ya están definidos todos los parámetros necesarios, el cálculo de la resistencia a aplastamiento sería el siguiente:

$$F_{b,Rd} = \frac{K_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}}$$

Para hallar K_1 , al ser un tornillo de extremo: el menor entre 2,5 y las siguientes ecuaciones:

$$\frac{1,4p_2}{d_0} - 1,7$$

$$\frac{2,8e_2}{d_0} - 1,7$$

Para hallar α_b , el menor entre 1,0 y la siguiente ecuación:

$$\alpha_d \frac{f_{ub}}{f_u}$$

Donde α_d correspondería a despejar esta fórmula (por ser un tornillo de extremo):

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0}$$

Los datos de los tres parámetros a calcular descritos anteriormente aparecerían tabulados en la tabla inferior:

| | | F_{b,Rd} (N) |
|-----------------------|--------|-----------------------------|
| K₁ | 1,66 | 21991,68 |
| α_d | 0,7143 | |
| α_b | 1 | |
| γ_{M2} | 1,25 | |

Tabla 4. Valores resultantes de la fuerza de aplastamiento teórica

Indicar que para este valor de fuerza de aplastamiento hay que multiplicarlo por un coeficiente debido a que el resultado final tiene que ser 0,8 veces la resistencia del tornillo en agujeros normalizados. Por lo tanto, la fuerza de aplastamiento de referencia mostraría un valor de:

$$F_{b,Rd} = 17593,34 \text{ N}$$

Por último, como verificación final, se tiene que cumplir la siguiente condición para asegurarse de que se está cumpliendo la normativa (punto 10 del apartado 3.6): al ser una unión de solape único (con una única fila de tornillos), la resistencia de cálculo a aplastamiento $F_{b,Rd}$ para cada tornillo debería limitarse a:

$$F_{b,Rd} \leq \frac{1,5 f_u d t}{\gamma_{M2}}$$

Sustituyendo los datos de la ecuación, quedaría:

| | | ¿Se cumple? |
|---------------------------------------------------------|--------------|--------------------|
| F_{b,Rd} (N) | 17593,34 (N) | Sí |
| $\frac{1,5 f_u d t}{\gamma_{M2}}$ (N) | 19872 (N) | |

Tabla 5. Condición para la unión de solape mínimo con una fila de tornillos

2.4.2. Resistencia a cortante

La ecuación para hallar la resistencia a cortante de la unión atornillada es la que se muestra a continuación:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}}$$

Donde el parámetro α_v le corresponde el valor de 0,6 porque (ver tabla 3.4 del EC):

- El plano de cortante pasa por la parte roscada del tornillo.
- Se trabaja con un tornillo de alta resistencia de grado 8.8.

El resultado teórico final con todos los datos necesarios (junto con los iniciales) aparece en la tabla 6:

| | | $F_{v,Rd}$ (N) |
|---------------|------|----------------|
| α_v | 0,6 | 32371,2 |
| γ_{M2} | 1,25 | |

Tabla 6. Valores resultantes de la resistencia a cortante teórica

2.4.2.1. Comprobación para aplastamiento, a cortante

En la siguiente figura aparecen las dos condiciones a cumplir para este caso:

$$\begin{aligned}
 F_{v,Ed} &\leq F_{v,Rd} \\
 F_{v,Ed} &\leq F_{b,Rd}
 \end{aligned}$$

Figura 7. Criterio de resistencia por aplastamiento y a cortante

Para averiguar el valor de $F_{v,Ed}$, se necesitaría sacarlo de la simulación del modelo (cuyo valor es de 12550,00 N). Por lo tanto, para la primera condición de la figura 7:

| $F_{v,Ed}$ (N) | $F_{v,Rd}$ (N) | ¿ $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$? |
|----------------|----------------|------------------------------|
| 12550,00 | 32371,2 | Sí |

Tabla 7. Comprobación de si se cumple el primer criterio de aplastamiento y cortante

Dado que el primer requisito la cumple, sólo haría falta comprobar la segunda restricción:

| $F_{v,Ed}$ (N) | $F_{b,Rd}$ (N) | ¿ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$? |
|----------------|----------------|------------------------------|
| 12550,00 | 17593,34 | Sí |

Tabla 8. Comprobación de si se cumple el segundo criterio de aplastamiento y cortante

Finalmente, tal y como se contempla en todas las comprobaciones de este apartado, se cumplirían todas las condiciones propuestas según el Eurocódigo 3.

CAPÍTULO 3: MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

3.1. Introducción

Métodos numéricos, como el de elementos finitos, han constituido la gran alternativa, sobre todo con la aparición del ordenador, para dar soluciones aproximadas de problemas cuya formulación y/o geometría no permiten encontrar solución analítica.

La mayoría de las estructuras tienen un comportamiento, el cual no puede expresarse de forma precisa en función de un número pequeño de variables discretas. Por tanto, se define **el método de los elementos finitos** como: la simulación de un sistema físico (con sus geometrías y condiciones de carga) por aproximación matemática de un sistema real.

El MEF es hoy en día el procedimiento más potente para el análisis de estructuras de carácter uni, bi o tridimensional sometidas a las acciones externas más diversas.

La idea general del método de los elementos finitos es la división o discretización de un sistema continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados **nodos**, que los conectan entre sí y les transmite información de unos a otros. Un nodo, en definitiva, es una localización en el espacio de un punto en el que se considera que existen ciertos grados de libertad (desplazamientos, temperaturas, etc..) y acciones (fuerzas, condiciones de contorno, etc..) del sistema físico. Un **elemento** es la representación matemática matricial de la interacción entre los grados de libertad de un conjunto de nodos. Los elementos pueden ser lineales, superficiales, volumétricos o puntuales y pueden estar en espacios bidimensionales o tridimensionales.

Las ecuaciones que rigen el comportamiento del sistema continuo regirán también el del elemento. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no.

En un sistema estructural, el conjunto de grados de libertad incluye tres traslaciones y tres rotaciones.

Las condiciones de contorno estructurales incluyen:

- Restricciones de desplazamientos
- Fuerzas aplicadas en nudos
- Presiones sobre los elementos
- Temperaturas en nudos
- Cargas volumétricas o de inercia (gravedad)

En este caso, solamente se han tenido en cuenta las tres primeras, por ser las otras nulas o despreciables en su análisis, como es el caso de la gravedad.

3.2. Etapas en la aplicación de los MEF

Todo problema de análisis por el método de los elementos finitos sigue las tres fases consecutivas siguientes:

- Preprocesado
- Cálculo
- Post-procesado

Cada una de las cuáles se divide a su vez en otras etapas que se pueden resumir en el esquema de la figura 8.

En este esquema, además de las tres fases mencionadas, aparece como último cumplimiento, la realización de las modificaciones que se crean convenientes como consecuencia de las comprobaciones y análisis de las soluciones obtenidas. Las modificaciones a tener en cuenta suelen deberse a:

1. La teoría de cálculo de estructuras elegida no fue apropiada.
2. Elección de una malla muy grosera para reproducir la distribución de desplazamientos o las tensiones correctamente.
3. La necesidad de usar elementos finitos más precisos. Puede suceder que el tipo de elemento elegido no represente bien nuestro sistema, no dando una solución todo lo buena posible.
4. Aparición de dificultades debidas a problemas de precisión asociados al método de solución del sistema de ecuaciones.
5. Errores de datos que aparezcan.

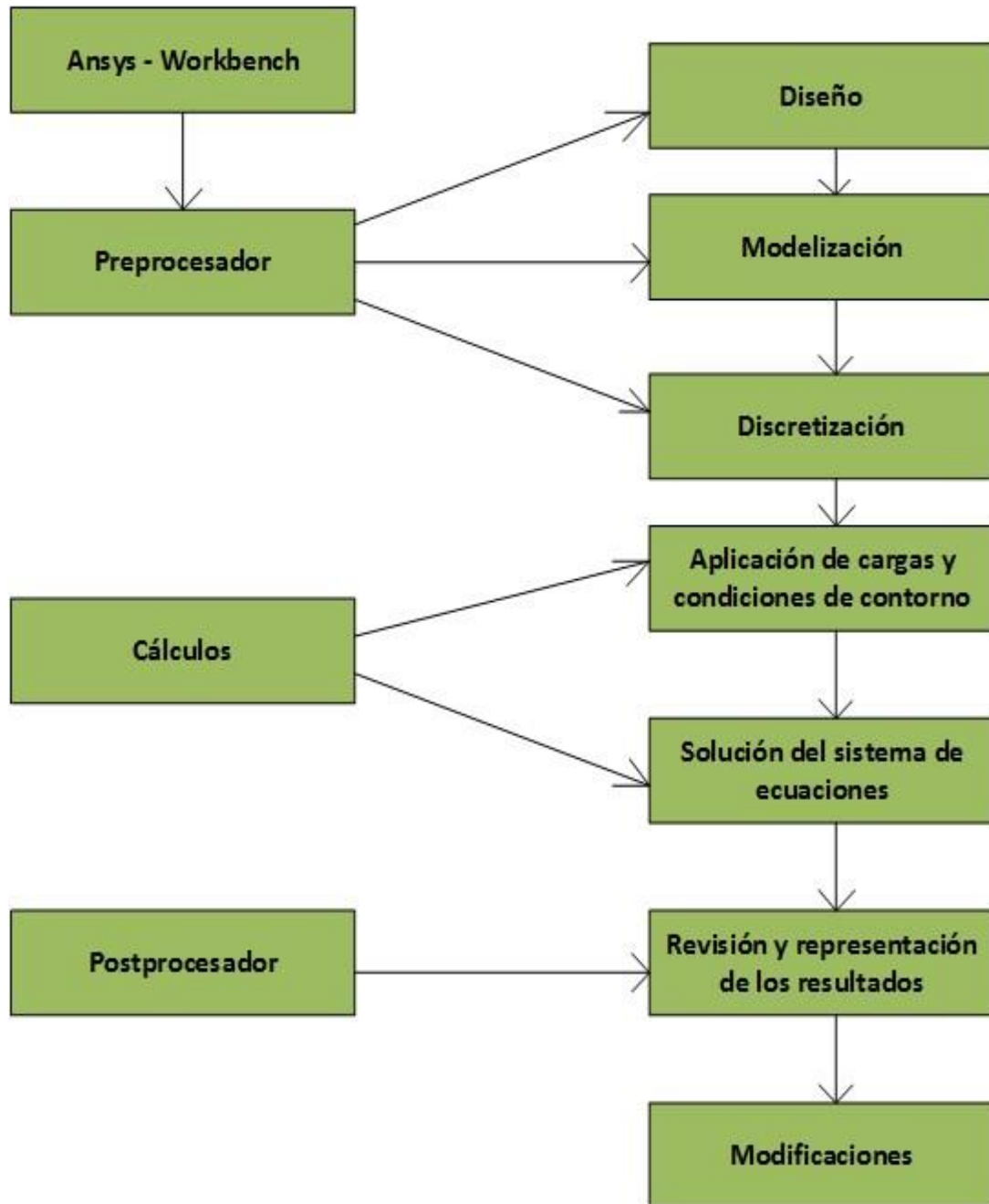


Figura 8. Esquema de las etapas seguidas en el MEF

3.3. Pasos previos

En una primera etapa es donde se crea la geometría de la unión viga-pilar, apoyándose en un software de diseño paramétrico que facilita el proceso y que permitirá su posterior exportación al programa ANSYS. El programa elegido a tal efecto ha sido *Ansys Workbench-Modeller* como ya se ha indicado anteriormente.

En dicho programa se ha dibujado el detalle tridimensional de la unión completa, a partir del ensamblaje de los distintos elementos sólidos que la componen. El resto de elementos que constituyen el pórtico se añadirán en una segunda etapa, una vez el modelo sea exportado del entorno Workbench al programa *ANSYS 18.2*, en la fase de preprocesado.

La figura siguiente muestra el diseño inicial creado en *Ansys Workbench*:

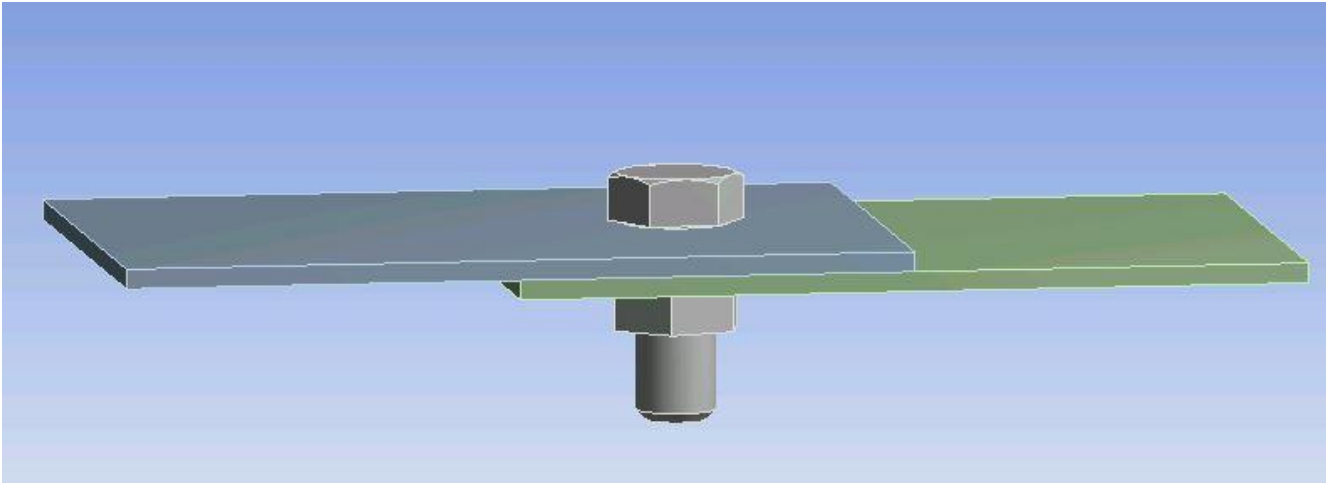


Figura 9. Modelo de la unión chapa-tornillo

Una vez definida la geometría inicial, se exportará al módulo *Ansys Workbench-Simulation*. En dicho módulo se definen los siguientes aspectos del modelo:

1. El tipo de material de los distintos elementos que componen la unión

- Acero estructural S250: chapas
- Acero de tornillos de alta resistencia de calidad 8.8

2. El número de contactos existentes y el tipo de cada uno de ellos

Ajustando la tolerancia de detección automática de contactos en 3, rehaciéndolo se obtendrían hasta 5 contactos existentes en la unión atornillada los cuales todos los contactos son de fricción:

- Contacto nº1: parte de abajo tornillo con chapa 1 (chapa de la izquierda de la figura 8)
- Contacto nº2: vástago tornillo-tuerca con chapa 1
- Contacto nº3: vástago tornillo-tuerca con chapa 2 (chapa de la derecha de la figura 9)
- Contacto nº4: parte de arriba tuerca con chapa 2
- Contacto nº5: entre chapa 1 y chapa 2

3. Se procederá al mallado de la unión

Para los tipos de contacto mencionados en el punto 2, se usa un tipo de malla denominado *contact region* con un tamaño de elemento de 1,5mm.

Además, para el espesor (las 4 caras que forma el rectángulo) de ambas chapas se le añade un mallado refinado de valor 2.

En la figura 10 se observaría el mallado final en el modelo simplificado, mientras que en la figura 11 se mostraría en detalle la forma del refinado en los espesores de las chapas.

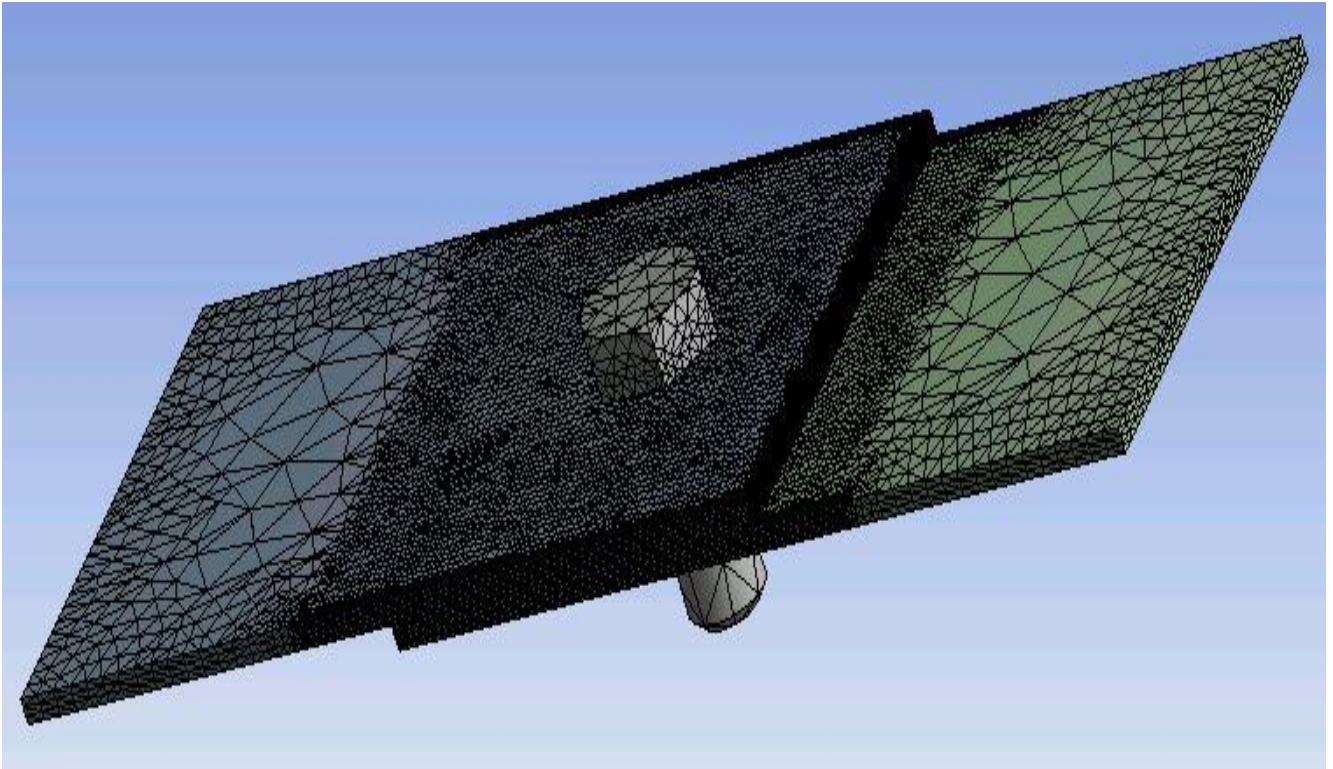


Figura 10. Mallado final del modelo simplificado

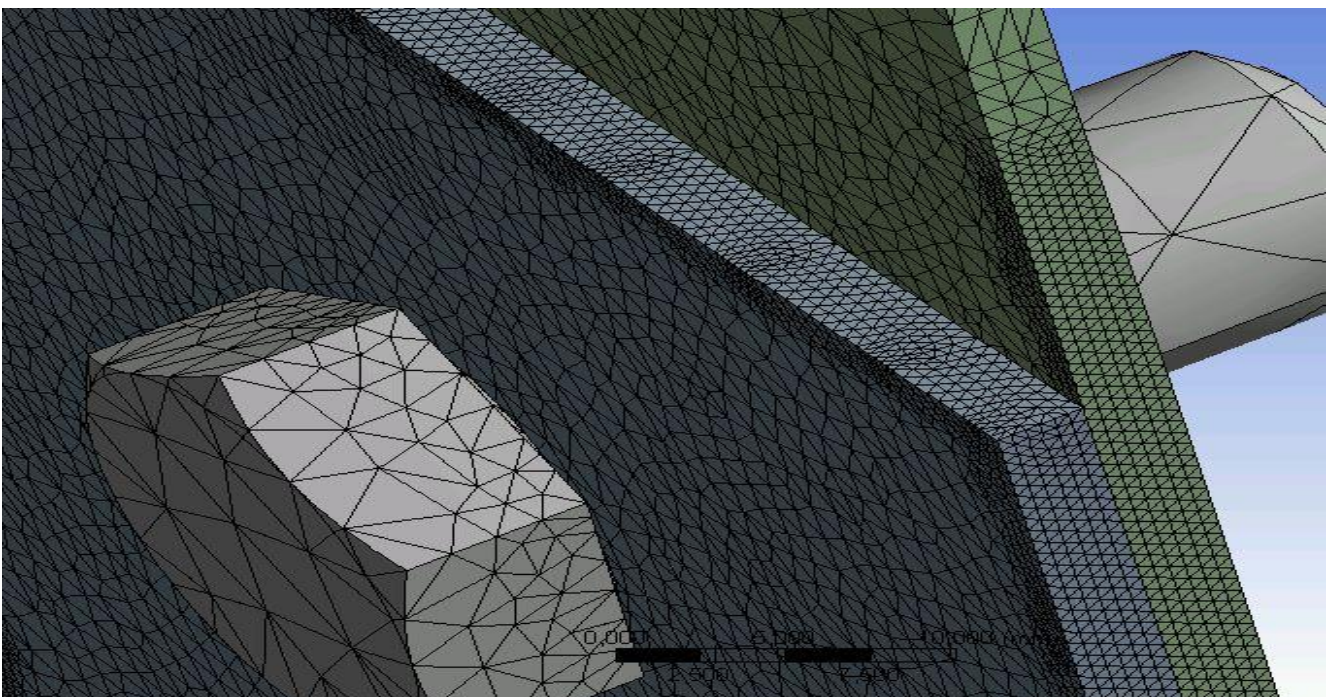


Figura 11. Vista en detalle de la malla refinada en parte de las dos chapas

4. La fuerza de pretensado del tornillo:

Para hallar la fuerza necesaria para introducir en el programa de elementos finitos en función de su métrica, se usa la siguiente ecuación sacada del EN 1090-2: 2006-10 (para una llave dinamométrica):

$$F_{p,c} = \frac{M_t}{K d}$$

Donde,

- . M_t : par de apriete admisible (para todos los casos, será igual a 150 Nm)
- . K : constante que depende de los coeficientes de rozamiento (al ser un valor estándar para los valores trabajados, se usa un valor constante de 0,18)
- . d : diámetro nominal del tornillo a trabajar

Acto seguido, dada y comentada la ecuación, se procederá a calcular la fuerza de pretensado correspondiente para cada métrica del tornillo a analizar:

| Métrica del tornillo | Diámetro nominal (mm) | Fuerza de pretensado (N) |
|----------------------|-----------------------|--------------------------|
| M12 | 12 | 69333 |

Tabla 9. Resultado de la fuerza de pretensado para esta métrica

En la figura inferior, se muestra el pretensado del tornillo:

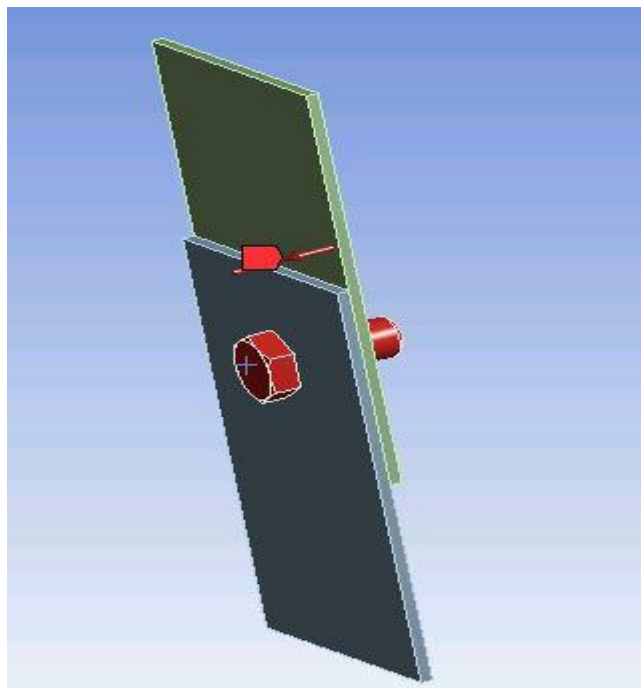


Figura 12. Pretensado tornillo en el modelo

3.4. Fase 1: Preprocesado

Esta primera etapa se puede resumir en dos fases clave para una buena resolución del problema, que son, la **modelización** más adecuada para describir el comportamiento de la estructura y la **discretización** de la geometría de los elementos finitos. Además, dentro de las mismas se incluye la selección del elemento más apropiado para definir el resto del pórtico, generación del mallado, definición de todos los nodos y elementos, propiedades del material, constantes reales, y en este caso, también interviene el contacto.

3.4.1. Modelización

La modelización consiste en una simplificación de la estructura eliminando todos los elementos que no tengan una función estructural, se eliminan recovecos y los detalles innecesarios y se uniformizan espesores. Es la idealización matemática de un sistema físico.

En un principio, cualquier estructura continua debe considerarse como un sólido tridimensional, pero bajo determinados supuestos es posible construir un modelo matemático uni o bidimensional que proporcione la información suficiente para resolver el problema concreto planteado.

3.4.1.1. Contacto

3.4.1.1.1. Generalidades

Los problemas de contacto son altamente no lineales y requieren un gran esfuerzo computacional, por consiguiente, es importante entender la física del problema y realizar un modelo tan eficiente como sea posible.

El contacto presenta dos problemas fundamentales:

1. Generalmente no se conoce la región de contacto hasta que no es resuelto el problema. Dependiendo de las cargas, materiales, condiciones de contorno y otros factores, las superficies pueden entrar y salir en contacto entre ellas a lo largo de un comportamiento impredecible.
2. Muchos problemas de contacto necesitan fricción. Existen varias leyes de fricción y modelos para escoger y todas son no lineales. Encontrar una solución al problema físico de la fricción puede resultar difícil como consecuencia de la dificultad de su solución numérica.

3.4.1.1.2. Clasificación

Se puede encontrar dos tipos de problemas de contacto:

- Flexible-Flexible
- Rígido-Flexible

En el presente trabajo se han implementado unos contactos del tipo flexible-flexible, de modo que todas las superficies de contacto son tratadas como flexibles, puesto que todas las partes serían deformables (tienen similar rigidez).

3.4.1.1.3. Capacidades de contacto

El programa de elementos finitos soporta tres tipos de modelos de contacto:

- Nudo-Nudo
- Nudo-Superficie
- Superficie-Superficie

Cada tipo de modelo usa un tipo de elemento diferente que sea apropiado a las especificaciones.

En este caso, se ha empleado un modelo superficie-superficie que ha utilizado los dos siguientes tipos de elementos para formar una pareja de contacto y cuyas características veremos más adelante:

- La superficie target es modelada con el elemento TARGE170
- La superficie contact es modelada con el elemento CONTA174

Para crear la pareja de contacto, se debe asignar el mismo número de constante real para ambos elementos.

En las siguientes figuras se observan las parejas de contacto existentes:

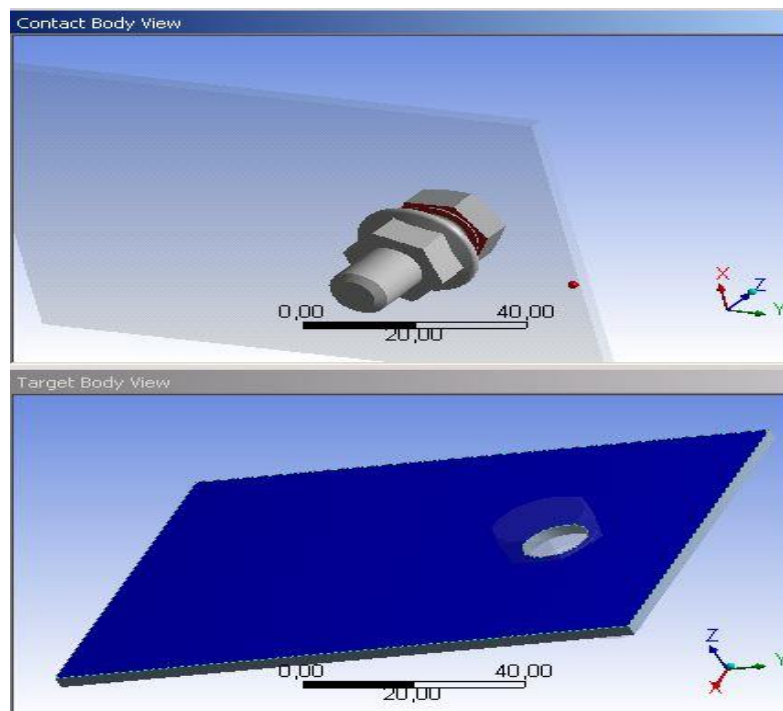


Figura 13. Contacto parte de abajo tornillo con chapa 1

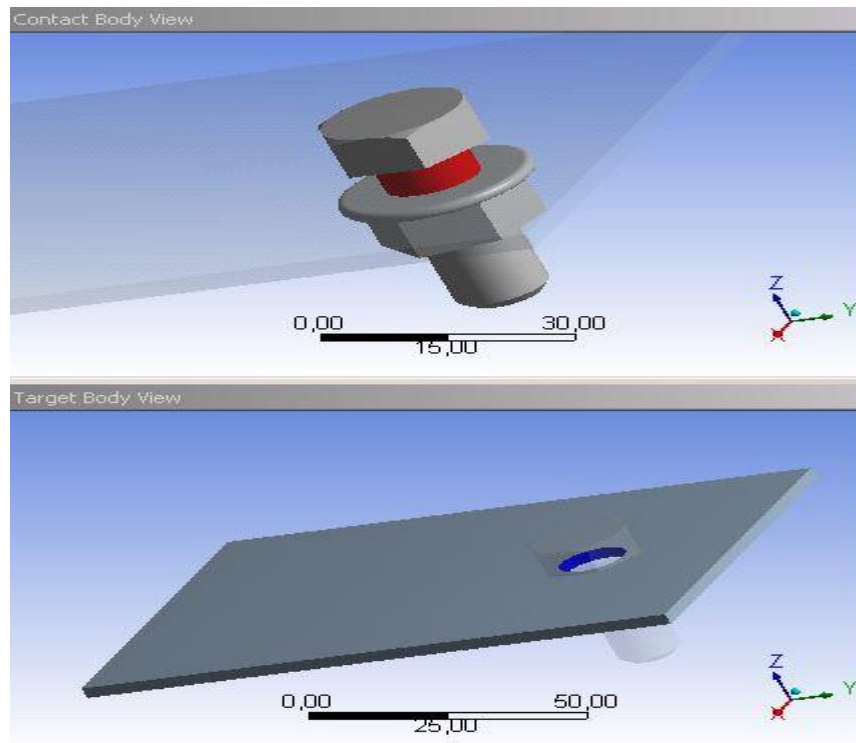


Figura 14. Contacto vástago tornillo-tuerca con chapa 1

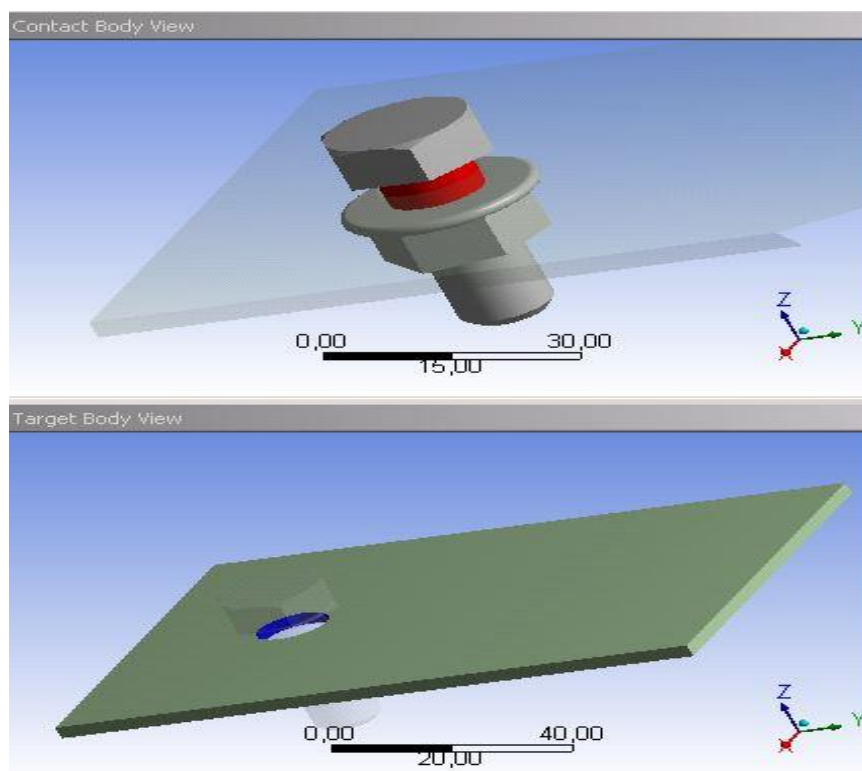


Figura 15. Contacto vástago tornillo-tuerca con chapa 2

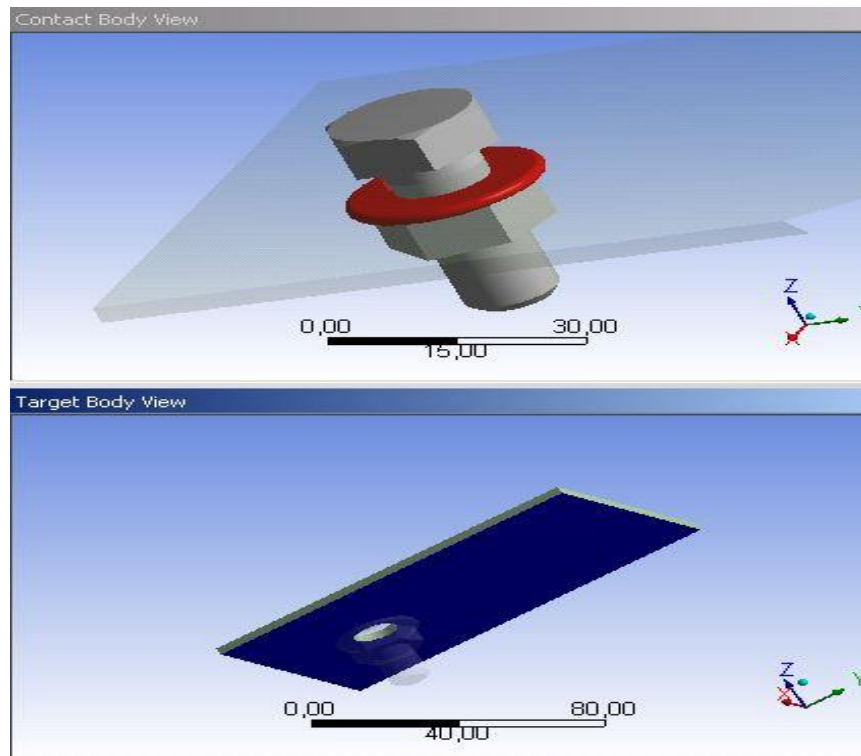


Figura 16. Contacto parte de abajo tuerca con chapa 2

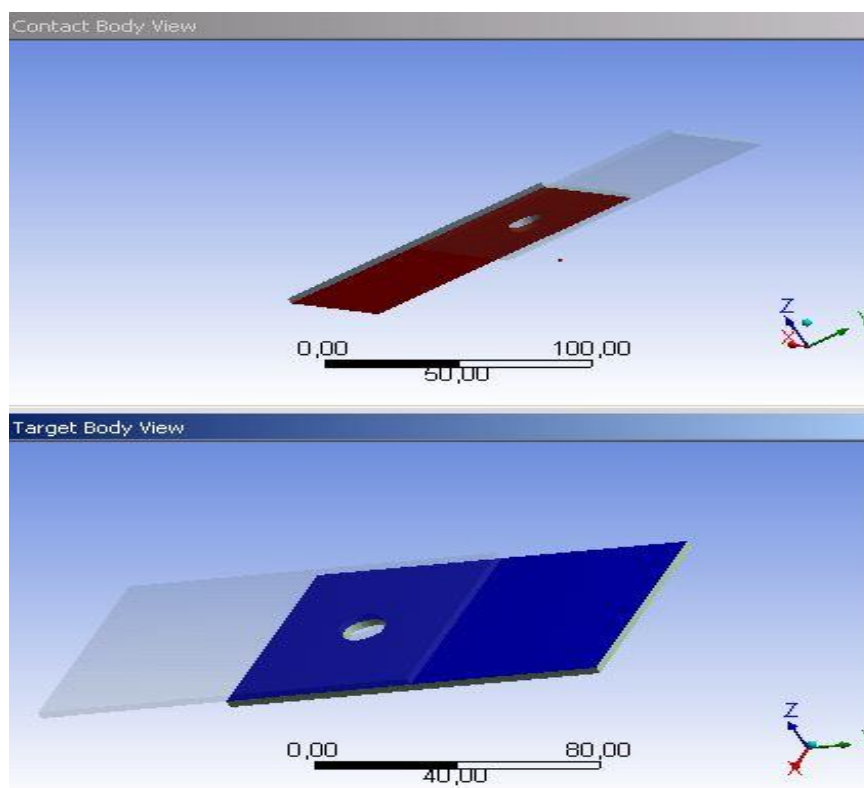


Figura 17. Contacto chapa 1 con chapa 2

Por último, las ventajas de los elementos superficie-superficie son las siguientes:

- Soportan elementos de distinto orden y tamaño en la modelización de una pareja de contactos.
- Soportan grandes deformaciones con una cantidad significativa de deslizamiento y fricción, eficientemente.
- En problemas típicos de ingeniería, con presiones y tensiones de fricción normales, producen mejores resultados de contacto.
- No tienen restricciones en la forma de la superficie target (destino).
- Requiere menor cantidad de elementos de contacto ocupando menos espacio y con una visualización eficiente.
- Permite numerosos controles de modelado.

3.4.1.1.4. Pasos seguidos

1. Crear geometría y mallado de la unión en *Workbench*
2. Identificar parejas de contacto en *Workbench*
3. Designar la superficie target y contact en *Workbench*
4. Definir superficie target en *ANSYS*
5. Definir superficie contact en *ANSYS*
6. Opciones de elemento y constantes reales en *ANSYS*
7. Aplicar las condiciones de contorno necesarias en *ANSYS*

Cabe destacar que los pasos 4, 5, 6 y 7 se llevan a cabo solamente en el caso de realizar modificaciones en el modelo de elementos finitos, puesto que el entorno de simulación *ANSYS Workbench-Simulation* genera adecuadamente los contactos definidos en dicho entorno, para ser importados desde *ANSYS*.

3.4.1.2. Elección del tipo de elemento

Se trata de una decisión importante y suele ser tomada de forma personal por el ingeniero que debe pronunciarse en base a:

1. Las características propias de la estructura a analizar.
2. Los tipos de elementos, programas de cálculo y capacidad de ordenadores disponibles.
3. La experiencia acumulada en la solución de estructuras similares por el método de los elementos finitos.

Junto con estos planteamientos generales, también se pueden encontrar una serie de normas mínimas que facilitarán al ingeniero un poco más la elección del elemento.

- En caso de que se tenga una cierta idea de la forma polinómica de la solución conviene utilizar elementos con funciones de forma del mismo grado que la solución conocida. Esto no sólo favorece la obtención de la solución exacta en los nodos, sino que también garantiza que la variación de los desplazamientos en el interior de cada elemento sea la correcta. Sin embargo, esta situación no ocurre en la mayor parte de los casos prácticos.

- En zonas donde se intuya que pueden existir gradientes de tensiones elevados es más adecuado utilizar elementos de mayor orden. Por el contrario, en zonas donde dicha variación sea más uniforme puede obtenerse una buena aproximación con elementos menos precisos.
- Dadas las crecientes posibilidades de rapidez de cálculo y de capacidad de almacenamiento de los ordenadores actuales, algunos autores recomiendan utilizar elementos finitos sencillos (pocos nodos) frente a elementos más complejos (muchos nodos), aunque esta decisión debe tomarse, manteniendo un compromiso con los puntos anteriores.

Si se requiere obtener una buena aproximación utilizando elementos sencillos, será necesario emplear un mayor número de ellos que si la discretización se realizara con elementos más complejos.

La principal ventaja que se deriva de la utilización de elementos sencillos radica en el cálculo de las matrices de rigidez que resulta más económico, lo que justifica la competitividad de los mismos, aún utilizándose en mayor número, puesto que los problemas asociados al mayor número de variables son cada vez menos importantes, dado el creciente avance en velocidad de los computadores.

El problema no tiene fácil solución cuando se trata de elegir entre dos elementos de órdenes similares, estando condicionada en este caso la solución a la experiencia del ingeniero en la resolución de otros problemas. Algunos autores en este punto recomiendan que en ese caso de duda se utilice siempre el elemento más sencillo, aunque esto es cuestionable si el problema no tiene una gran dimensión.

3.4.1.2.1. Elemento tipo SOLID 187

Será el elemento usado para modelizar los tornillos y los tramos del pilar y dintel de la unión:

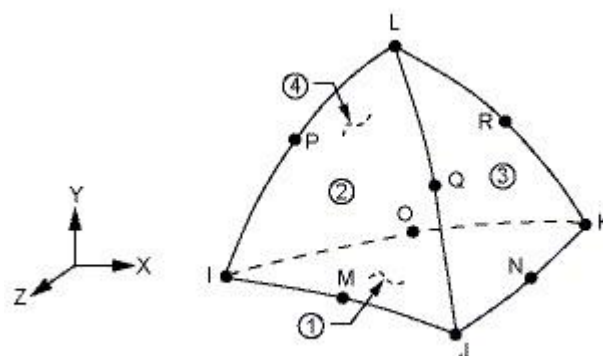


Figura 18. Contacto SOLID 187

El elemento SOLID 187 es adecuado para modelar geometrías fuertemente irregulares. Es un elemento tridimensional cúbico formado por diez nodos con tres grados de libertad en cada nodo: traslaciones en las direcciones X, Y y Z.

Este elemento es apropiado para trabajar con plasticidad, hiperelasticidad, fluencia, endurecimiento por deformación y grandes desplazamientos y capacidades de deformación.

Un resumen de los datos de entrada se muestra en la siguiente tabla:

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nombre elemento | SOLID 187 |
| Nodos | I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R |
| Grados de libertad | UX, UY, UZ |
| Constantes reales | Ninguna |
| Propiedades del material | EX, EY, EZ, ALPX, ALPY, ALPZ (o CTEX, CTEY, CTEZ o THSX, THSY, THSZ), PRXY, PRYZ, PRXZ (o NUXY, NUYZ, NUXZ), DENS, GXY, GYZ, GXZ, DAMP. |
| Características especiales: Se refieren a plasticidad, hiperelasticidad, viscoelasticidad, viscoplasticidad, fluencia, endurecimiento por deformación, grandes deformaciones, grandes desplazamientos, importante tensión inicial. | |
| KEYOPT (6) | Se refiere a la formulación del elemento. |
| KEYOPT (10) | Leer tensión inicial de una subrutina. |

Tabla 10. Resumen del elemento SOLID 187

3.4.1.2.2. Elemento tipo Conta 174 y Targe 170

Estos elementos son los usados para modelar contactos superficie-superficie.

A la hora de realizar el contacto es importante identificar bien las superficies involucradas. Una de ellas será la superficie *contact* y la otra superficie *target*. Los elementos que forman la superficie tendrán restringida su penetración en la superficie *target* mientras que los elementos de la superficie *target* pueden penetrar a través de la superficie *contact*.

Así en el contacto entre el tornillo y cualquiera de las dos chapas, la superficie que simula la zona sobre la que apoya el tornillo hará de superficie *contact* y la superficie de la chapa hará de superficie *target*.

3.4.1.2.2.1. Elemento tipo Conta 174

El elemento Conta 174 es un elemento tridimensional de ocho nodos. Es usado, además de para modelizar contactos, en deslizamientos entre superficies. El contacto entre superficies se producirá cuando los elementos Conta 174 penetren en los elementos de la superficie definida como *target*.

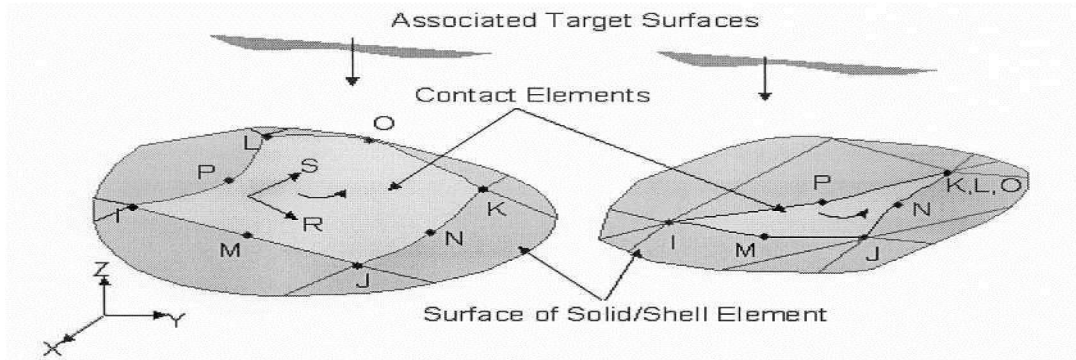


Figura 19. Contacto superficie - superficie

Aunque el elemento está formado por ocho nodos puede degenerar en seis dependiendo del tamaño de los elementos SOLID.

Resumen de los datos de entrada del elemento:

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nombre del elemento | CONTA174 |
| Nodos | I, J, K, L, M, N, O, P |
| Grados de libertad | UX, UY (si KEYOPT (1) = 0) UX, UY, TEMP (si KEYOPT (1) = 1) |
| Constantes reales | R1, R2, FKN, FTOLN, ICONT, PINB, PMAX, PMIN, TAUMAX, CNOF, FKOP, FKT, COHE, TCC, FHTG, SBCT, RDVF, FWGT, (Blank), (Blank), FACT, DC |
| Propiedades del material | MU, EMIS |
| Características especiales: No linealidad, grandes deformaciones, inicio y fin. | |
| KEYOPT (1) | Seleccionar grados de libertad. |
| KEYOPT (2) | Seleccionar algoritmo de contacto. |
| KEYOPT (4) | Localización del punto final del contacto |
| KEYOPT (5) | Valor de separación entre superficies automático. |
| KEYOPT (7) | Control sobre el incremento. |
| KEYOPT (8) | Contacto simétrico. |
| KEYOPT (9) | Penetración o separación inicial. |
| KEYOPT (10) | Actualización del contacto. |
| KEYOPT (11) | Efectos del espesor. |
| KEYOPT (12) | Comportamiento de la superficie de contacto. |

Tabla 11. Resumen elemento CONTA 174

Las constantes reales R1 y R2 sólo son necesarias si los elementos target asociados tienen una forma determinada.

La constante FKN define un factor del comportamiento elástico en la dirección normal al contacto, de forma semejante a la constante FKT, la cual, junto con el coeficiente de rozamiento MU, define dichas condiciones en dirección tangencial, lo que permite escoger las condiciones del deslizamiento. La constante real FTOLN define un factor de tolerancia de penetración a aplicar en la dirección normal a la superficie.

El elemento soporta los siguientes algoritmos de contacto (KEYOPT (2)):

- Lagrangiano aumentado (por defecto).
- Función de penalización.
- Restricción multipunto (MPC).
- Multiplicador de Lagrange para el contacto normal y función de penalización para el deslizamiento tangencial.
- Multiplicadores de Lagrange para contacto normal y tangencial.

En este proyecto se ha utilizado un algoritmo del tipo función de penalización para todos los contactos, a excepción del contacto placa de testa-pilar que, para el caso de pretensado, se ha empleado el algoritmo Lagrangiano aumentado.

3.4.1.2.2. Elemento tipo Targe 170

Un resumen de los datos de entrada del elemento Targe 170 se presenta a continuación:

| | |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nombre del elemento | TARGE170 |
| Nodos | I, J, K, L, M, N, O, P (J - P no son necesarios en algunas formas del elemento) |
| Grados de libertad | UX, UY, UZ, TEMP (ROTX, ROTY, ROTZ sólo en los "nodos piloto") |
| Constantes reales | R1, R2, FKN, FTOLN, ICONT, PINB, PMAX, PMIN, TAUMAX, CNOF, FKOP, FKT, COHE, TCC, FHTG, SBCT, RDVF, FWGT, FACT, DC |
| Propiedades del material | Ninguna. |
| Características especiales: No linealidad, inicio y fin. | |
| KEYOPT (1) | Opciones del mallado. |
| KEYOPT (2) | Condiciones de contorno en superficies rígidas. |
| KEYOPT (3) | Comportamiento térmico. |

Tabla 12. Resumen elemento TARGE 170

Las constantes R1 y R2 tienen aplicación cuando se selecciona la forma del elemento; sin embargo, al realizar el mallado previo de las superficies, ANSYS escoge por defecto el tamaño correcto.

3.4.1.2.2. Elemento COMBIN 14

Será el elemento usado para modelizar unos muelles de pequeña rigidez asociados al soporte fijado en una de las chapas y al tornillo que une con las chapas.

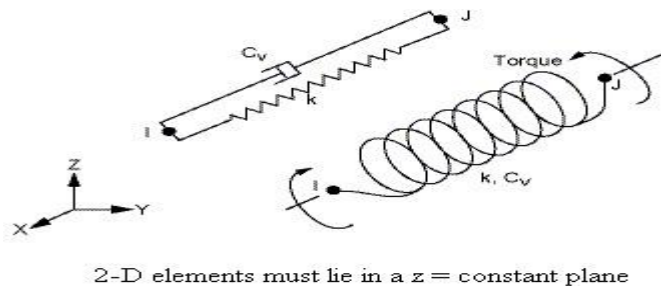


Figura 20. Elemento COMBIN 14

El elemento COMBIN 14 tiene capacidad longitudinal o torsional en aplicaciones de 1, 2 o 3 dimensiones. La opción de capacidad longitudinal de los muelles es la empleada en este caso, se caracteriza por un estado tensional uniaxial de tracción-compresión. Es un elemento con tres grados de libertad en cada nodo: traslaciones en las direcciones X, Y y Z. No se consideran los efectos de flexión y torsión. Los muelles se suponen sin masa.

Un resumen de los datos de entrada se muestra en la siguiente tabla:

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nombre del elemento | COMBIN 14 |
| Nodos | I, J |
| Grados de libertad | UX, UY, UZ (si KEYOPT (3) = 0) ROTX, ROTY, ROTZ (si KEYOPT (3) = 1) |
| Constantes reales | K – Constante del muelle CV1 – Coeficiente de amortiguación CV2 – Coeficiente de amortiguación (KEYOPT (1) debe ser 1) |
| Propiedades del material | DAMP |
| Características especiales: Se refieren a no linealidad (si CV2 no es 0), endurecimiento por deformación y grandes desplazamientos. | |
| KEYOPT (1) | Se refiere al tipo de solución (lineal o no lineal). |
| KEYOPT (2) | Grados de libertad para el comportamiento en una dimensión. |
| KEYOPT (3) | Grados de libertad para el comportamiento en dos y tres dimensiones. |

Tabla 13. Resumen elemento COMBIN 14

3.4.1.2.3. Elemento PRETS 179

Será el elemento usado para definir una superficie de pretensado de 2 o 3 dimensiones dentro del mallado del tornillo pretensado.

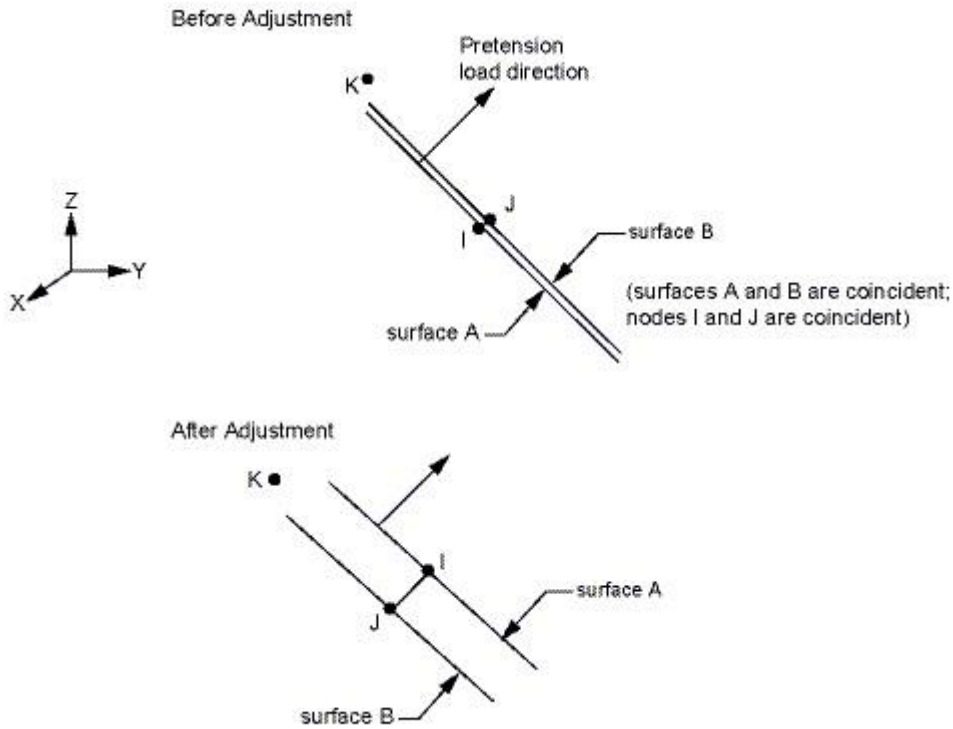


Figura 21. Elemento PRETS 179

El elemento PRETS 179 es adecuado para modelar con elementos SOLID entre otros. Tiene un grado de libertad (traslación en la dirección X) que representa la dirección de pretensado.

Un resumen de los datos de entrada se muestra en la siguiente tabla:

| | |
|------------------------------------|------------|
| Nombre del elemento | PRETS 179 |
| Nodos | I, J, K |
| Grados de libertad | UX |
| Constantes reales | Ninguna |
| Propiedades del material | DAMP |
| Características especiales: | No lineal. |
| KEYOPTs | Ninguna. |

Tabla 14. Resumen elemento PRETS 179

3.4.1.3. Materiales

Para introducir las propiedades de los materiales se tienen, como siempre, dos posibilidades: hacerlo directamente en la macro o bien mediante la tabla de propiedades que se despliega en el menú correspondiente del preprocesador. Como ya se ha comentado, la estructura se compone de acero estructural S250 y de acero de tornillos de alta resistencia 8.8.

3.4.1.3.1. Acero estructural S250

Las chapas están fabricadas con acero laminado en caliente S250, con un módulo elástico de 250 N/mm² y una resistencia última a tracción de 460 N/mm².

3.4.1.3.2. Acero del tornillo de alta resistencia

El único tornillo del trabajo es de acero de calidad 8.8 con un módulo elástico de 640 N/mm² y una resistencia última a tracción de 800 N/mm².

Las características lineales de ambos aceros que se necesitan definir son las siguientes y toman los valores que se dan a continuación:

| | |
|-------------------------------------------------------|----------------------|
| Densidad (Kg/m ³) | 7850 |
| Módulo elástico (GPa) | 210 |
| Coefficiente de Poisson | 0,3 |
| Coefficiente de expansión térmica (°C ⁻¹) | 1,2x10 ⁻⁵ |

Tabla 15. Propiedades del tornillo de alta resistencia

3.4.1.3.3. Superficies de contacto

Los coeficientes de rozamiento adoptados en las superficies de contacto deben ser definidos a partir de las propiedades de los materiales.

Para el modelo a estudiar se utilizó un único coeficiente de rozamiento entre todos los contactos, cuyo valor es $\mu = 0,12$.

3.4.2. Discretización

El modelo sólido cuyo diseño se explicó anteriormente, no entra dentro del proceso de la solución en el método de análisis por elementos finitos. Al final, toda la información sobre el análisis debe transferirse al modelo MEF (nudos y elementos) para su resolución.

Al proceso de crear un modelo de elementos finitos a partir de un modelo sólido se le denomina **mallado**.

El mallado realizado con el programa de elementos finitos para el detalle de la unión viga-pilar se mantiene, de forma que hay que mallar el resto del pórtico. Dicho mallado consta de cuatro pasos:

1. Asignar los atributos de los elementos (tipos de elementos, constantes reales, propiedades de los materiales, tipo de sección y orientación de la misma).
2. Especificar los controles del tamaño de la malla (controla la densidad de la malla).
3. Guardar la base de datos antes de mallar.
4. Generar la malla.

El modelo se ha mallado con diferentes tamaños dependiendo de la zona del mismo. Hay que tener en cuenta que, por lo general, cuanto más fina sea la malla, mejores serán los resultados que se obtengan. Sin embargo, hay veces que se está muy cerca de la respuesta correcta y un mayor número de elementos no contribuye a obtener una exactitud mayor, por lo tanto se debe de llegar a un compromiso para obtener el tamaño más adecuado.

En las siguientes figuras se aprecia el resultado del mallado en uno de los modelos estudiados:

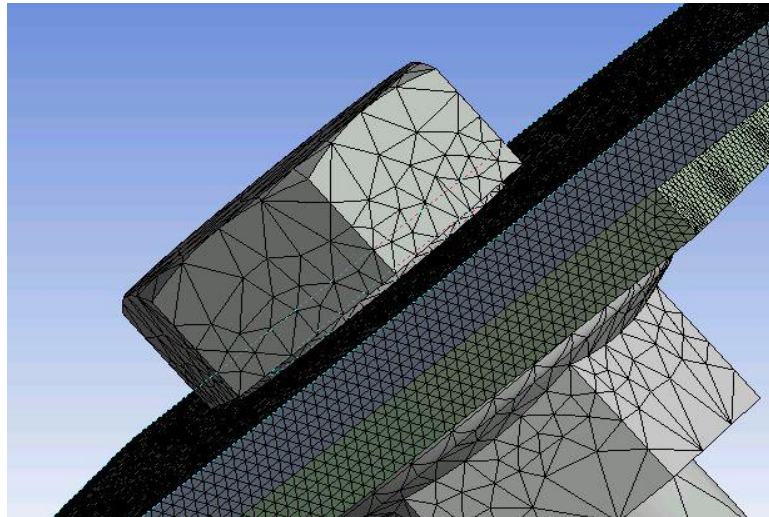


Figura 22. Mallado del contacto n°1

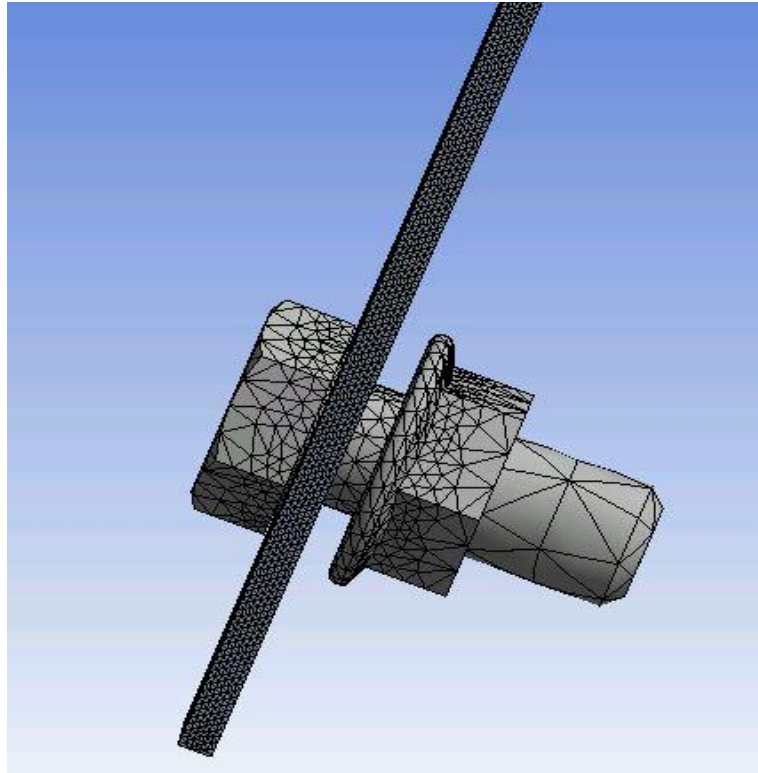


Figura 23. Mallado del contacto n°2

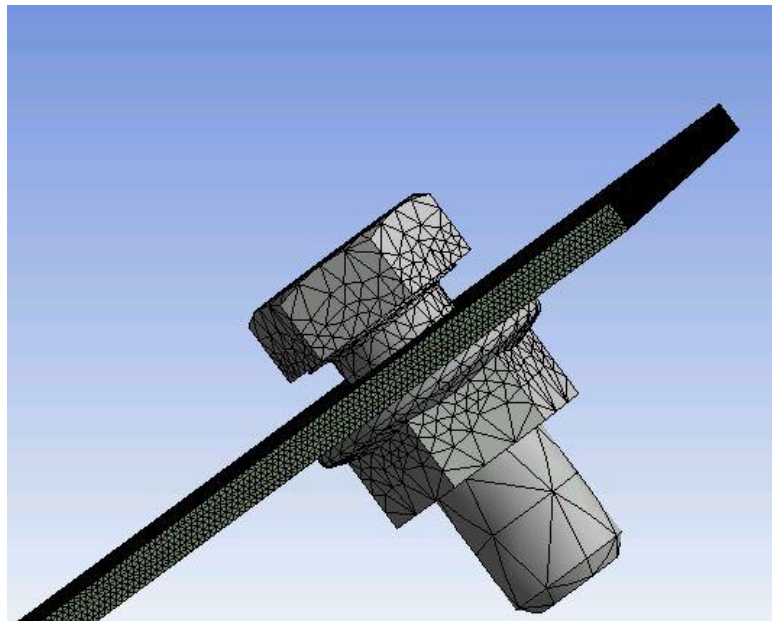


Figura 24. Mallado del contacto n°3

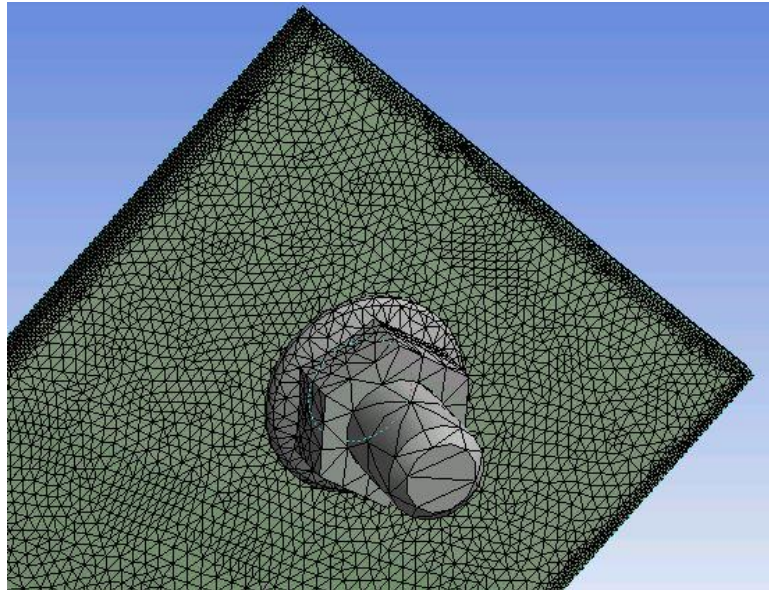


Figura 25. Mallado del contacto nº4

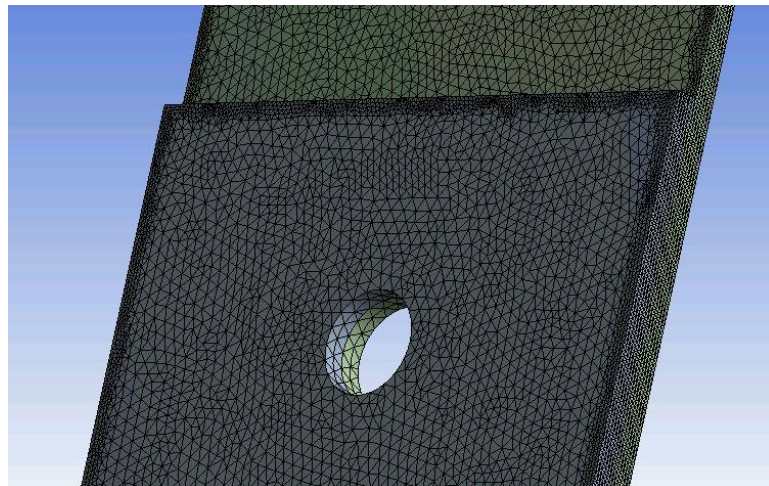


Figura 26. Mallado del contacto nº5

3.5. Fase 2: Cálculos

Una vez concluida la etapa de preprocesado da comienzo la etapa de cálculo. En ésta se puede obtener, entre otros, los resultados de las deformaciones, las tensiones y los esfuerzos en los diferentes puntos.

La resolución de las ecuaciones del método de los elementos finitos se llevará a cabo mediante un proceso iterativo basado en un algoritmo de Newton-Raphson, ya que se trata de un problema no lineal, en el cual las rigideces y el comportamiento estructural van modificándose a medida que se aplica la carga sobre el modelo, por lo que resulta necesario adoptar un método iterativo.

3.5.1. Tipos de análisis

El programa de elementos finitos abarca un gran número de tipos de análisis, entre ellos se encuentra el análisis térmico, eléctrico, magnético, sobre fluidos o de alta frecuencia, pero sin duda, el análisis estructural, es probablemente el de mayor aplicación para el método de los elementos finitos.

Los casos que se abarcan en este proyecto se adecuan, como es lógico, al **análisis estructural**, por tratarse de una estructura.

En un análisis estructural, las primeras incógnitas (grados de libertad nodales) calculadas, son los desplazamientos. Otras incógnitas, como son las tensiones, deformaciones y reacciones, son derivadas a partir de los desplazamientos nodales.

Dentro del estructural, se encuentran a su vez varios tipos de análisis, entre ellos se destacan el estático, modal, armónico, etc. En este proyecto, debido a una serie de peculiaridades, se analizará mediante un **análisis estructural no lineal**; estas peculiaridades se pueden agrupar en tres categorías o también llamadas no linealidades.

3.5.1.1. No linealidades

3.5.1.1.1. Primera no linealidad: geométrica

Cuando la estructura sufre bruscos cambios en la geometría dando lugar a respuestas no lineales debido a que experimenta grandes deformaciones.

En muchos problemas se admite implícitamente que las deformaciones y los desplazamientos producidos en la estructura son pequeños. Físicamente hablando, esto significa que la geometría de los elementos no varía durante la actuación de las fuerzas exteriores, y que las deformaciones pueden aproximarse de forma lineal y asimilarse a infinitésimos de primer orden. En la práctica, dichas hipótesis fallan a menudo y en muchos casos pueden presentarse grandes desplazamientos. Aunque los desplazamientos (o las deformaciones) sean grandes, las condiciones de equilibrio entre las fuerzas exteriores e interiores deben cumplirse. Así aplicando el principio de los trabajos virtuales se obtienen las ecuaciones de equilibrio siguientes:

$$\Psi(\vec{a}) = \iiint \bar{B}^T \vec{\sigma} dV - \vec{f} = 0 \quad (1)$$

donde Ψ representa la suma de fuerzas generalizadas interiores y exteriores, y \bar{B} se deduce de la definición del vector deformación $\vec{\varepsilon}$:

$$d\vec{\varepsilon} = \bar{B} d\vec{a} \quad (2)$$

\bar{B} se distingue con una barra porque, si los desplazamientos son grandes, las deformaciones son una función lineal de los desplazamientos, y la matriz \bar{B} depende ahora de \vec{a} en la forma:

$$\bar{B} = B_0 + B_L(\vec{a}) \quad (3)$$

donde B_0 es la misma matriz que interviene cuando no se consideran más que las deformaciones infinitesimales lineales y B_L es una función que depende de los desplazamientos. En general, B_L es una función lineal de los desplazamientos.

3.5.1.1.2. Segunda no linealidad: contacto

El programa de elementos finitos permite analizar el contacto superficie-superficie con grandes deformaciones, contacto y separación, fricción y muchas otras no linealidades.

El contacto superficie-superficie es un fenómeno que tiene lugar en un gran número de aplicaciones ingenieriles, como es el caso del presente trabajo.

El programa de elementos finitos representa el contacto como una serie de posiciones de puntos en una superficie (superficie de contacto) relativo a líneas o áreas de otra superficie (superficie target). El programa usa elementos de contacto para unir las posiciones relativas de las dos superficies. Los elementos de contacto pueden ser triangulares, tetraédricos o piramidales. Se trata de elementos finitos que usan una técnica de pseudo elemento para detectar el contacto. Ellos aplican unas fuerzas apropiadas sobre las dos superficies para hacer contacto y fricción.

El rango de problemas de contacto abarca desde contacto sin fricción con pequeños desplazamientos a contacto con fricción con grandes desplazamientos (caso analizado). Las condiciones de contacto se imponen en este trabajo sobre el principio de los trabajos virtuales usando la técnica del Método del Lagrangiano Aumentado (MLA) y de la Función de Penalización, tal y como ya se ha descrito en el apartado 3.4.1.2.2.1, ya que resultan ser más eficientes desde el punto de vista numérico, en función del tipo de contacto a resolver.

3.5.2. Cargas aplicadas y condiciones de contorno

En general las cargas se pueden aplicar directamente sobre el modelo de elementos finitos, es decir, sobre nudos y elementos, como es el caso o sobre el modelo sólido.

Las cargas se pueden clasificar en cinco categorías:

- Restricciones de los grados de libertad: valores específicos de grados de libertad (desplazamientos estructurales, temperaturas térmicas, potenciales magnéticos, etc.).
- Cargas superficiales: cargas distribuidas sobre una superficie (presiones estructurales, convención térmica, superficies magnéticas de Maxwell, etc.).
- Cargas concentradas: cargas puntuales (fuerzas estructurales, flujos térmicos de calor, líneas de corriente magnética, etc.).
- Fuerzas volumétricas: fuerzas volumétricas o de campo (temperaturas que producen dilataciones térmicas, generación interna de calor, densidad de corriente magnética, etc.).
- Fuerzas de inercia: fuerzas debidas a la masa estructural o a la inercia (gravedad, velocidad angular, etc.)

Para el presente trabajo, se tendría en cuenta únicamente la primera categoría: se añadiría al modelo simplificado un soporte fijado en una chapa, y un desplazamiento horizontal en la chapa opuesta.

3.5.2.1. Cargas aplicadas

La primera restricción consistiría en fijar la chapa de la izquierda, siendo equivalente a que la chapa forma una viga empotrada.

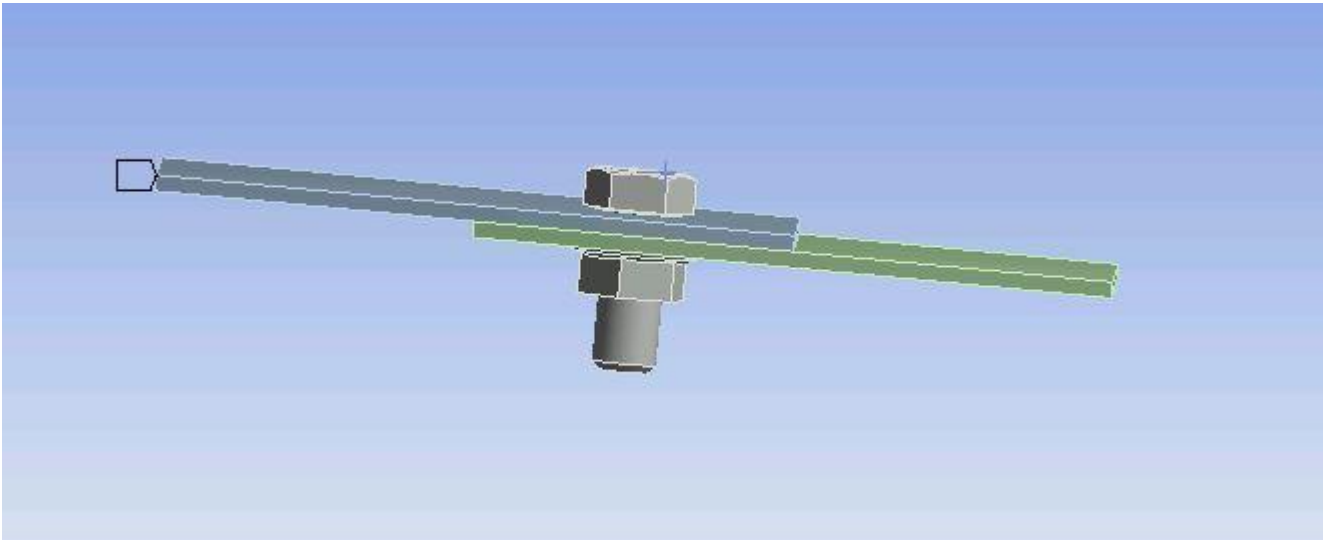


Figura 27. Primera restricción: soporte fijado en la chapa 1

La segunda restricción sería un desplazamiento horizontal (en el eje del programa de elementos finitos coincidiría con el eje OY) en el sentido positivo de dicho eje:

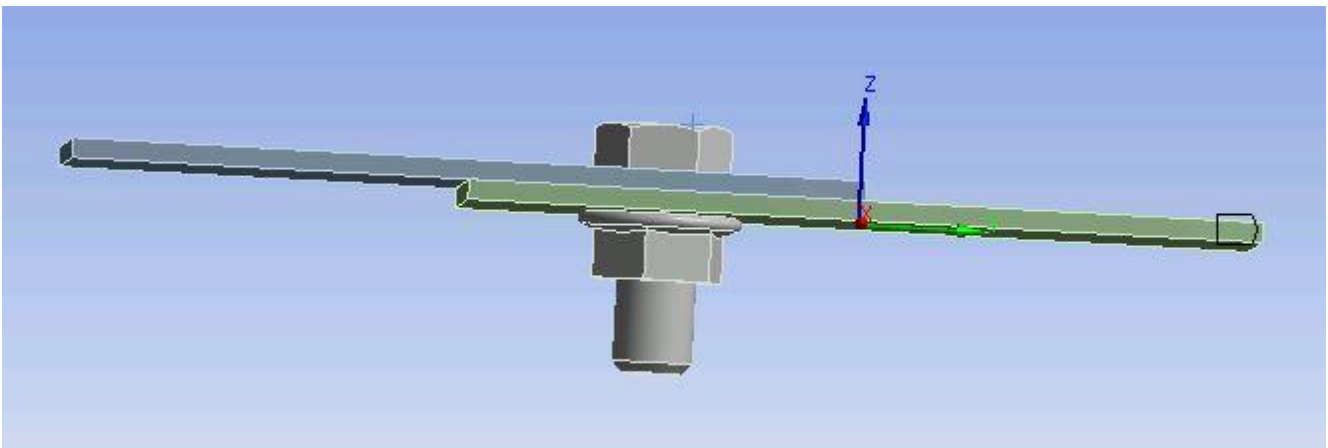


Figura 28. Segunda restricción: desplazamiento en la chapa 2

3.5.2.2. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno deberán reproducir fielmente aquellas que se plantearán en la situación de funcionamiento de la estructura.

El tornillo está unido solidariamente a las chapas y soportan las tensiones y deformaciones que les transmite tanto el pretensado como el desplazamiento.

3.5.2.3. Solución

La carga se aplica en forma de rampa, es decir, de forma progresiva en dos pasos de carga. Se comenzaría primero aplicando el pretensado en el tornillo en el primer paso de carga, y al terminar éste se desplazaría progresivamente la chapa derecha hasta llegar a un determinado valor.

En la figura se muestra un típico caso de carga de un análisis no lineal:

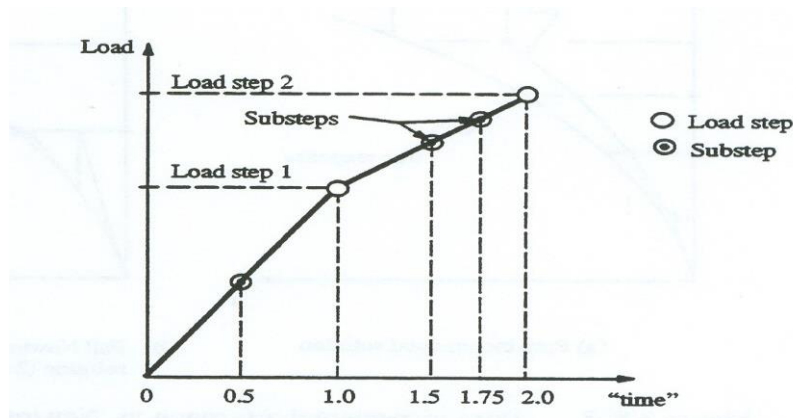


Figura 29. Aplicación progresiva de la carga en varios pasos

Para acelerar la convergencia de la solución se han empleado una serie de comandos que se detallan a continuación:

- KBC: Especifica la forma de aplicación de las cargas dentro de cada etapa de carga. Dicha aplicación se realiza en esta ocasión en forma de rampa, es decir, de forma progresiva e interpolando linealmente sus valores. En el caso de la unión con tornillos sin pretensar la carga se aplica en un solo paso y en el caso pretensado se hace en varias etapas.
- NEQIT: Especifica el número máximo de iteraciones permitidas en cada sub-etapa del análisis no lineal. En este caso se establece en 100 dicho número máximo.
- CNVTOL: Establece los valores de convergencia para el análisis no lineal. En este caso se busca la convergencia de las fuerzas y se fija una tolerancia para la misma de 0.015 (15%).
- TIMINT: Se encarga de activar o desactivar los efectos debidos a la inercia. En este caso dichos efectos no se consideran.
- DELTIM: Establece los pasos del algoritmo de Newton-Raphson, controlando el incremento máximo y mínimo de la carga aplicada en cada etapa de análisis.

3.6. Fase 3: Postprocesado

Una vez guardados los resultados de la solución en la base de datos, éstos pueden ser revisados mediante el postprocesador. Contamos con dos postprocesadores, el postprocesador general de ANSYS o **POST1** y el postprocesador histórico de ANSYS o **POST26**.

El análisis de resultados de un único estado de carga se realiza en el postprocesador general de ANSYS POST1. Sin embargo, con el POST26 podemos analizar la evolución de las variables que previamente hallamos definido para su estudio. Dado que este proyecto aplicaremos la sollicitación gradualmente, analizaremos la solución mediante el POST26. Así obtendremos los valores de las distintas variables cuyo resultado nos interesa (momento, giro, reacciones, etc) en cada uno de los substeps. Para analizar un determinado estado, utilizaremos el POST1.

El postprocesado es probablemente el paso más importante en el análisis porque es donde se intenta comprender cómo las cargas aplicadas afectan al diseño, como de bueno es el elemento de mallado, etc.

CAPÍTULO 4: ESTUDIO DE LA UNIÓN TORNILLO-CHAPA

A continuación, se expondría los resultados principales del modelo estándar realizado.

Primero de todo, se indicaría la respuesta teórica en la gráfica fuerza – deformación describiendo cada una de las regiones.

Para finalizar, se mostraría los datos resultantes de la gráfica fuerza – deformación en el programa de elementos finitos tabulados con su correspondiente gráfica.

Habría dos modelos resultantes: el primero de todos, mostraría los resultados con un desplazamiento arbitrario (de 1,5mm). Partiendo de los datos del desplazamiento arbitrario, se haría una interpolación hallando el desplazamiento debido a la fuerza de aplastamiento a introducir en el programa.

En dicha tabla, las dos primeras columnas reflejarían las características de simulación (tipo de métrica, espesor de las chapas, coeficiente de rozamiento, el valor del pretensado en el tornillo y el desplazamiento entre chapas) y las columnas restantes el tiempo de simulación con sus respectivas deformaciones (en mm) y la fuerza de reacción entre ellas (en N).

4.1. Gráfica fuerza – deformación teórica

La parte más importante (y a la vez, la más compleja del presente TFM) viene a partir de obtener las gráficas fuerza-deformación del modelo (facilitado por un fabricante):

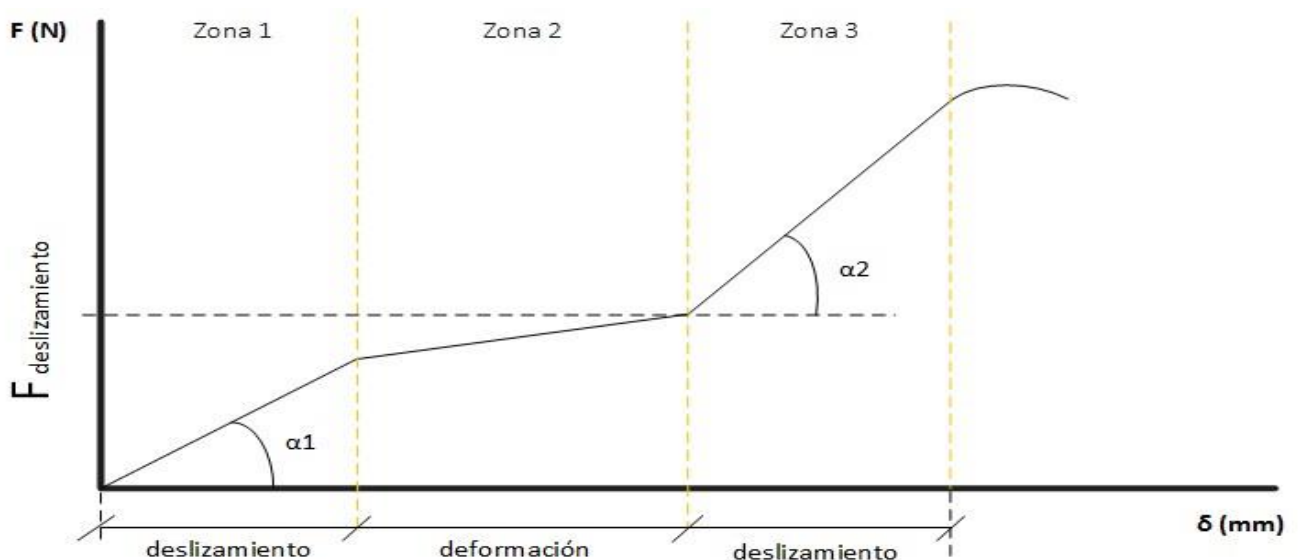


Figura 30. Diagrama fuerza - deformación teórica del proyecto

En la figura superior, se indica la trayectoria que sigue el contacto entre el tornillo-tuerca y la chapa. Tal y como se indica en dicha figura, hay diferentes zonas (o regiones) en las que está dividida la gráfica:

- **Zona 1:** sería la primera región de deslizamiento. En esta zona lo que más interesaría es averiguar la pendiente que forma la horizontal y la gráfica justo en el límite entre la zona 1 y la zona 2 (ángulo α_1).

También es importante buscar lo que vale el punto límite entre ambas zonas (que sería la fuerza de deslizamiento). Esta fuerza de deslizamiento dependería del: rozamiento (μ), el par de apriete (M_t) Es decir:

$$F_{deslizamiento} = f(\mu, M_t, \dots)$$

- **Zona 2:** correspondería a la región debida a la deformación. Hay un cambio de pendiente porque entra en juego los rozamientos estático y dinámico. El parámetro que más interesaría es la distancia que abarca toda esta zona (llamada d), que dependería de:

$$d = f(\mu, M_t, \text{métrica tornillo, diámetro chapa, espesor chapa})$$

- **Zona 3:** la segunda región de deslizamiento, donde el vástago entraría en contacto con las chapas.

4.2. Modelos resultantes en el programa de elementos finitos

4.2.1. Modelo de prueba

| Métrica | 12 | Tiempo (s) | Deformación máxima (mm) | Fuerza (N) |
|-------------------------------|-------|------------|-------------------------|------------|
| Espesor chapas (mm) | 3 | 0,1 | 0,0009 | -22,222 |
| Coefficiente rozamiento | 0,12 | 0,2 | 0,0018 | -37,591 |
| Valor pretensado tornillo (N) | 69444 | 0,35 | 0,0031 | -78,504 |
| Desplazamiento (mm) | 1,5 | 0,575 | 0,0049 | -137,17 |
| | | 0,7875 | 0,0066 | -183,22 |
| | | 1 | 0,0083 | -236,81 |
| | | 1,25 | 0,3767 | 35461 |
| | | 1,5 | 0,7529 | 64721 |
| | | 1,875 | 1,3190 | 104650 |
| | | 1,975 | 1,4796 | 94835 |
| | | 2 | 1,5198 | 89330 |

Tabla 16. Valores resultantes del modelo de prueba

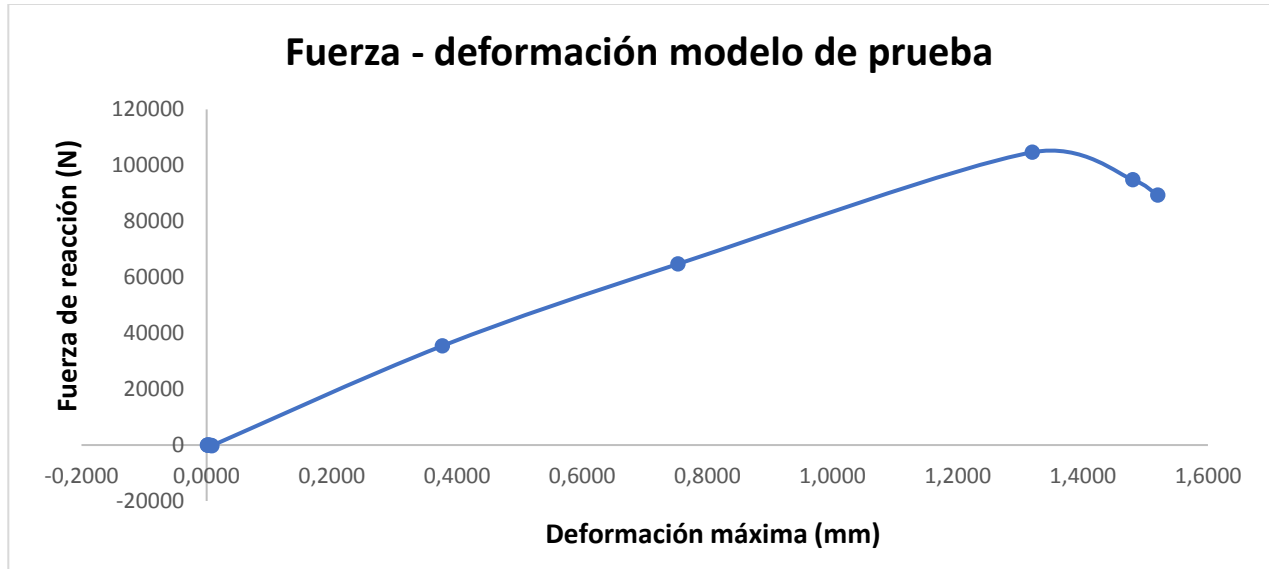


Figura 31. Gráfica fuerza - deformación del modelo de prueba

Sabiendo que la fuerza por aplastamiento hallada al final del capítulo 2 dio un valor de 17593,34 N; con los datos de la tabla 16 se interpolaría para despejar el desplazamiento equivalente para dicha fuerza:

$$\frac{35461 + 236,81}{0,3767 - 0,0083} = \frac{35461 - 17593,34}{0,3767 - \delta_{b,Rd}} \Rightarrow \delta_{b,Rd} = 0,1923 \text{ mm}$$

4.2.2. Modelo real obtenido por el criterio de aplastamiento

| Métrica | 12 | Tiempo (s) | Deformación máxima (mm) | Fuerza (N) |
|-------------------------------|--------|------------|-------------------------|------------|
| Espesor chapas (mm) | 3 | 0,1 | 0,000414 | 12,29 |
| Coefficiente rozamiento | 0,12 | 0,2 | 0,00134 | 58,036 |
| Valor pretensado tornillo (N) | 69444 | 0,35 | 0,00167 | 89,801 |
| Desplazamiento (mm) | 0,1923 | 0,575 | 0,00231 | 99,11 |
| | | 0,9125 | 0,00370 | 130,61 |
| | | 1,4125 | 0,00562 | 195,47 |
| | | 1,7063 | 0,00671 | 245,13 |
| | | 2 | 0,00778 | 293,45 |
| | | 2,1 | 0,0121 | 1535,2 |
| | | 2,2 | 0,0194 | 2533,7 |
| | | 2,35 | 0,0338 | 4225,2 |
| | | 2,5 | 0,0483 | 5961,4 |
| | | 2,725 | 0,07 | 8297,9 |
| | | 3,0625 | 0,10258 | 10579 |
| | | 3,4 | 0,13518 | 12882 |
| | | 3,7 | 0,16441 | 14543 |
| | | 4 | 0,19447 | 12595 |

Tabla 17. Valores resultantes del modelo real obtenido por aplastamiento

Tal y como se aprecia, la forma de la gráfica es parecida a la gráfica teórica mostrada en la figura 31.

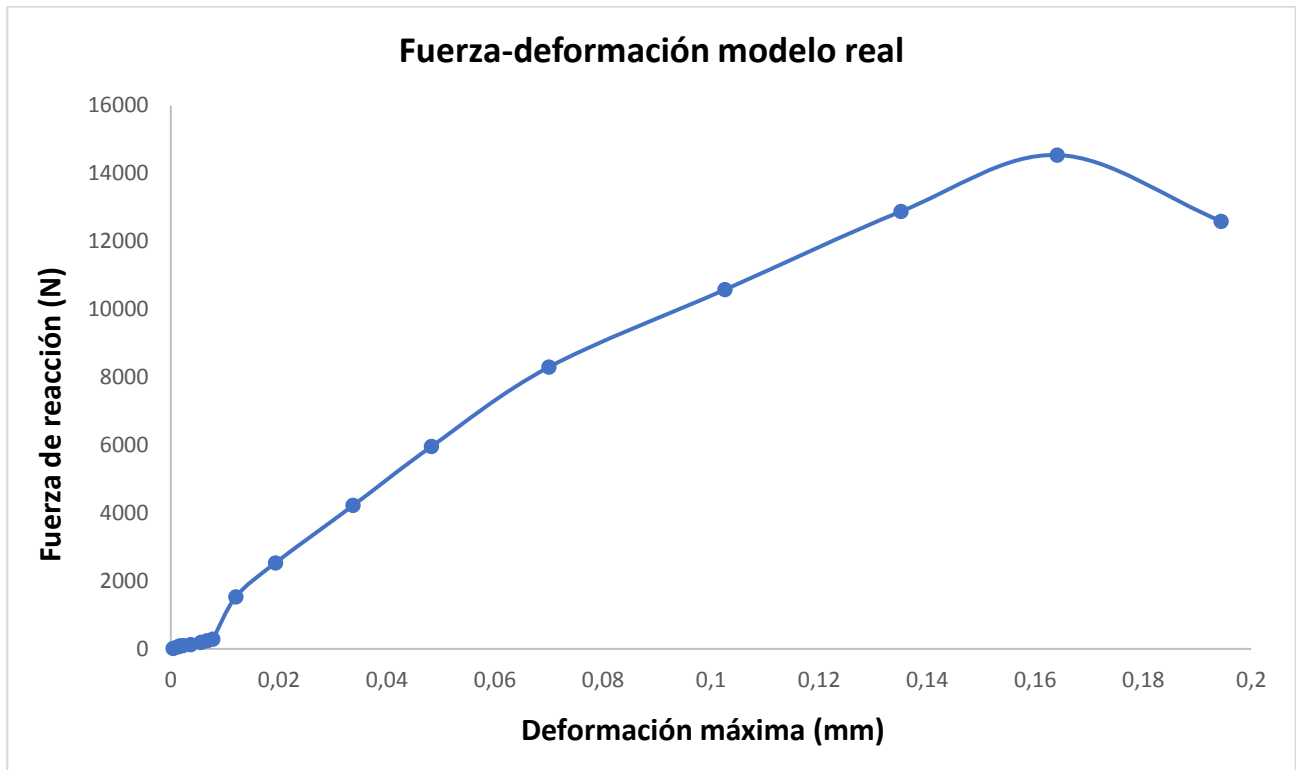


Figura 32. Gráfica de los valores del modelo real obtenidos por aplastamiento

4.3. Resultados del modelo por aplastamiento

4.3.1. Deformación máxima a aplastamiento

4.3.1.1. Deformación máxima del conjunto

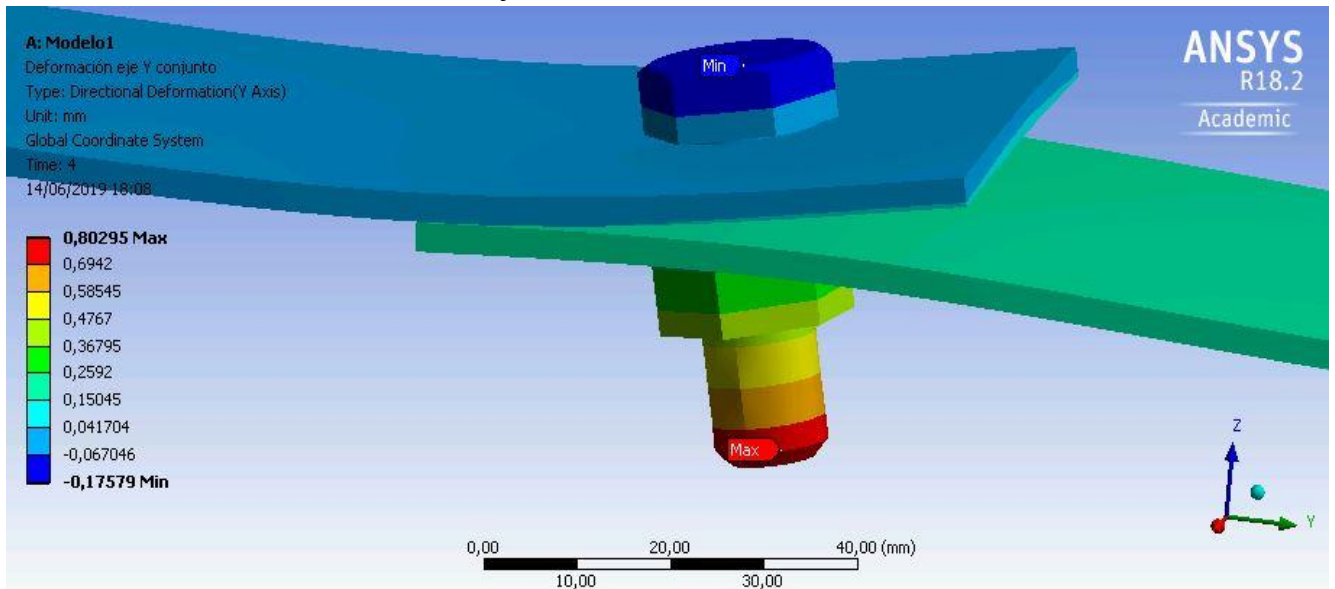


Figura 33. Deformación máxima del conjunto por aplastamiento

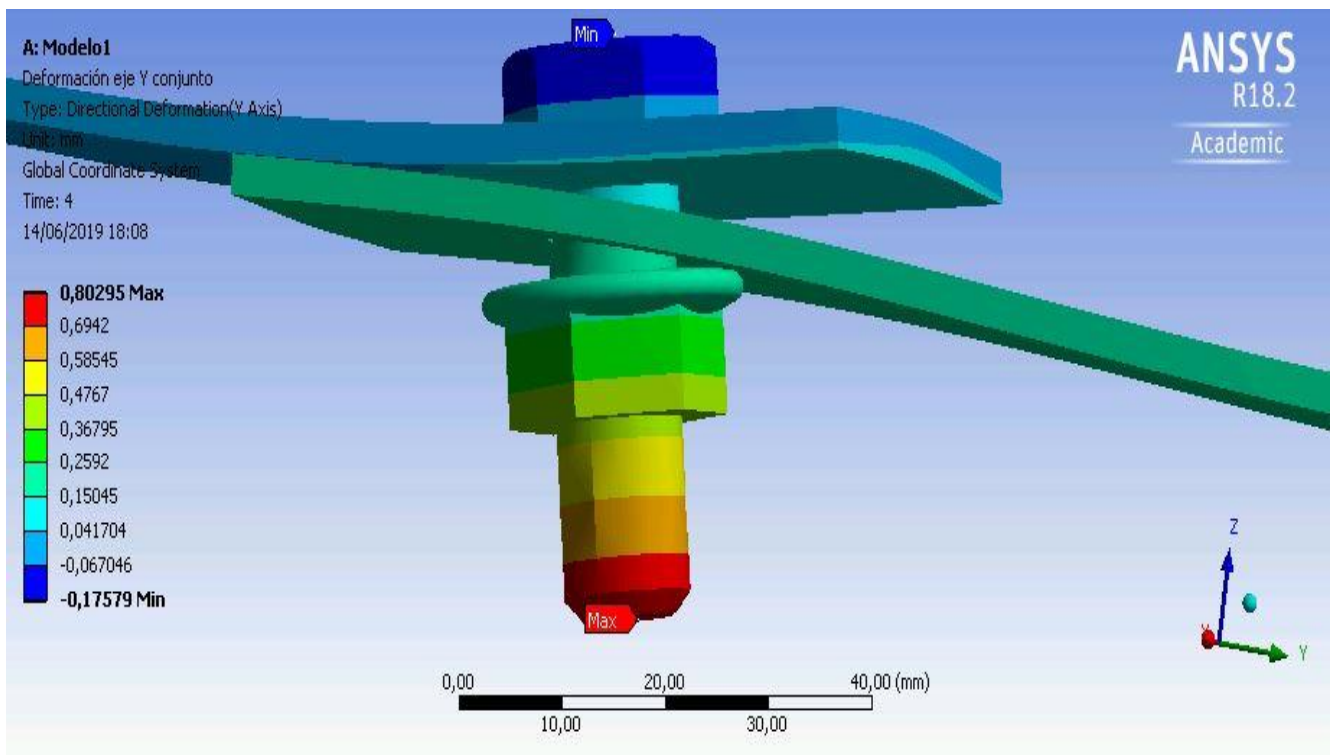


Figura 34. Otra perspectiva de la deformación total del conjunto por aplastamiento

4.3.1.2. Deformación máxima en las chapas

Como recordatorio, en la chapa 1 estaba a su izquierda el soporte fijo, mientras que en la derecha de la chapa 2 se sometía al desplazamiento.

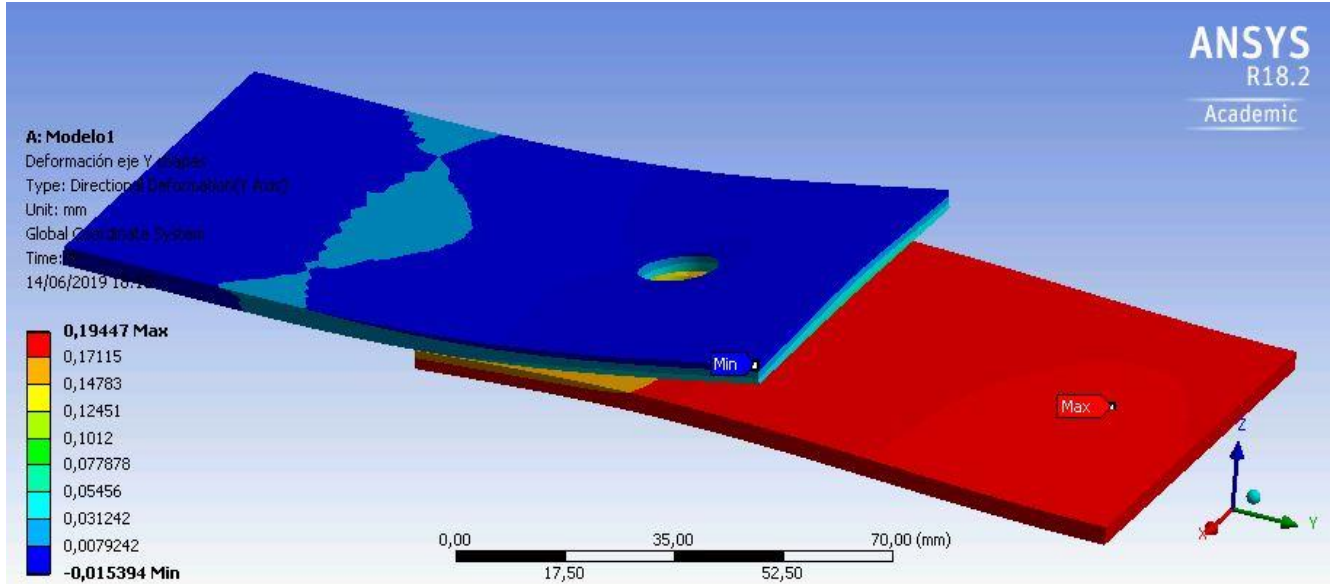


Figura 35. Deformación máxima en las chapas por aplastamiento

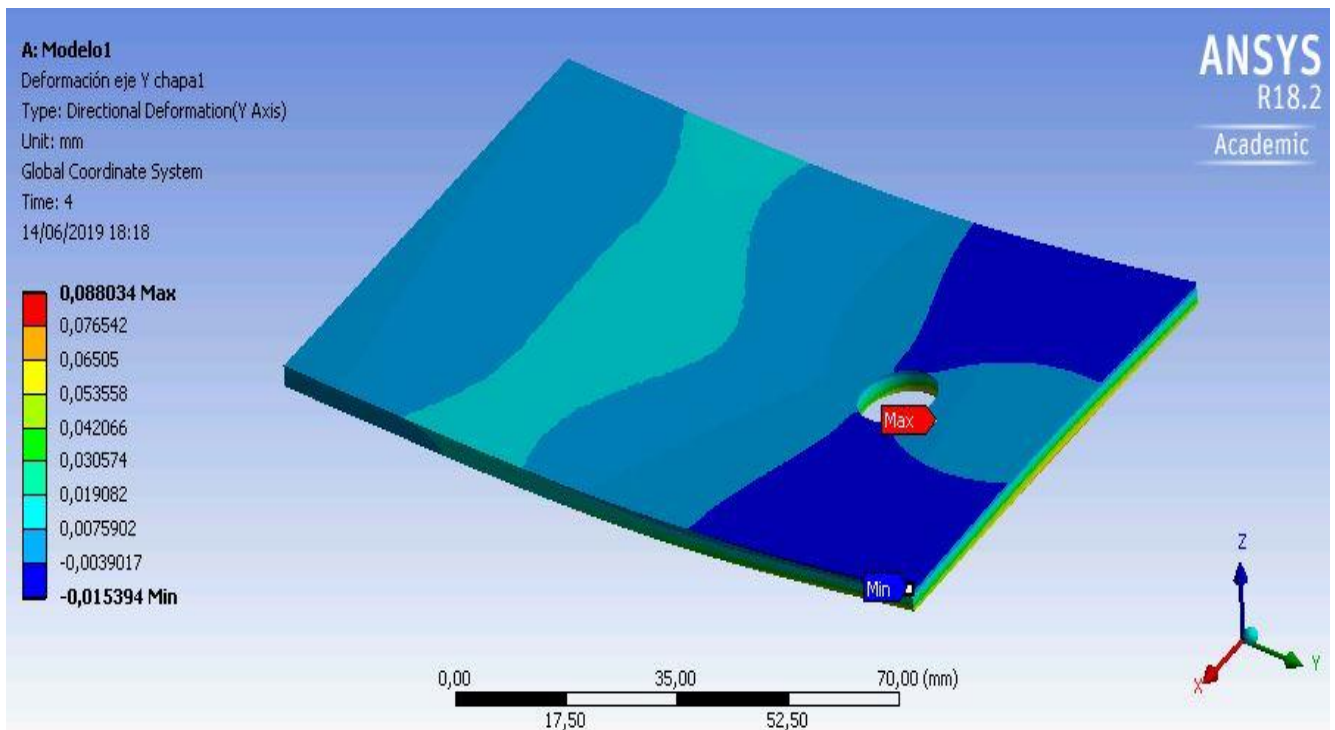


Figura 36. Deformación chapas parte superior chapa1 por aplastamiento

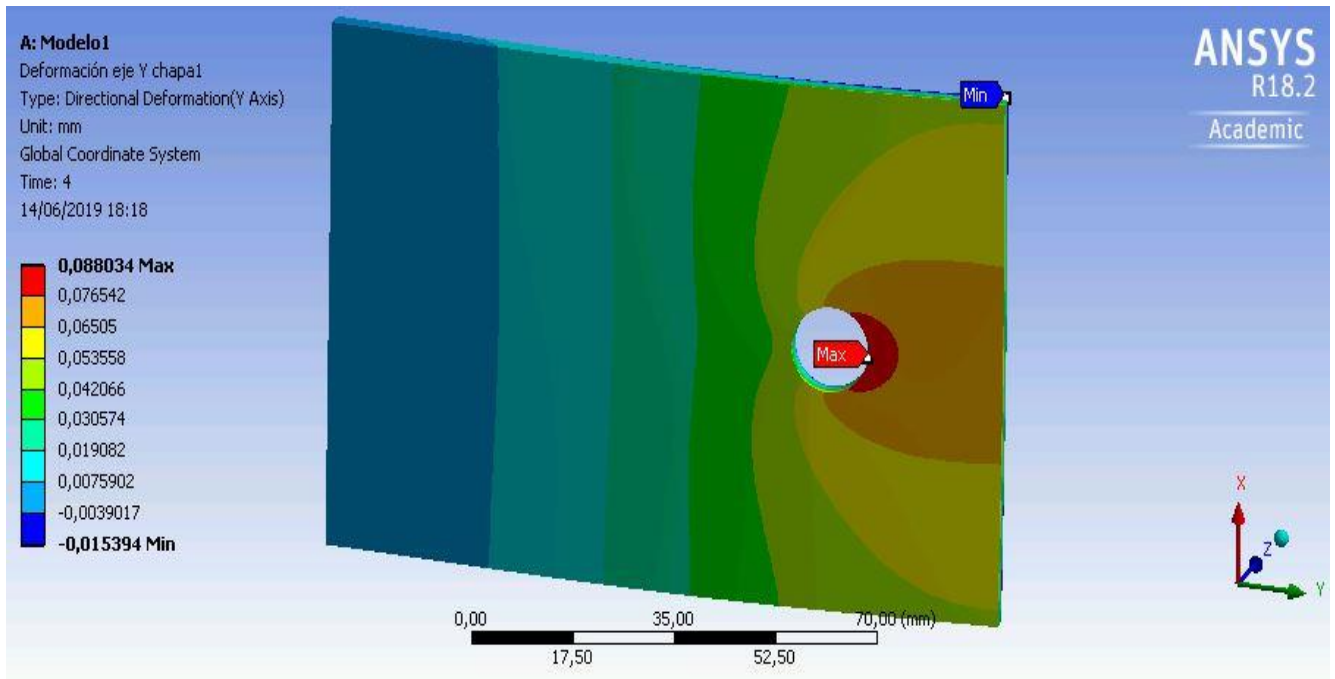


Figura 37. Deformación chapas parte inferior chapa1 por aplastamiento

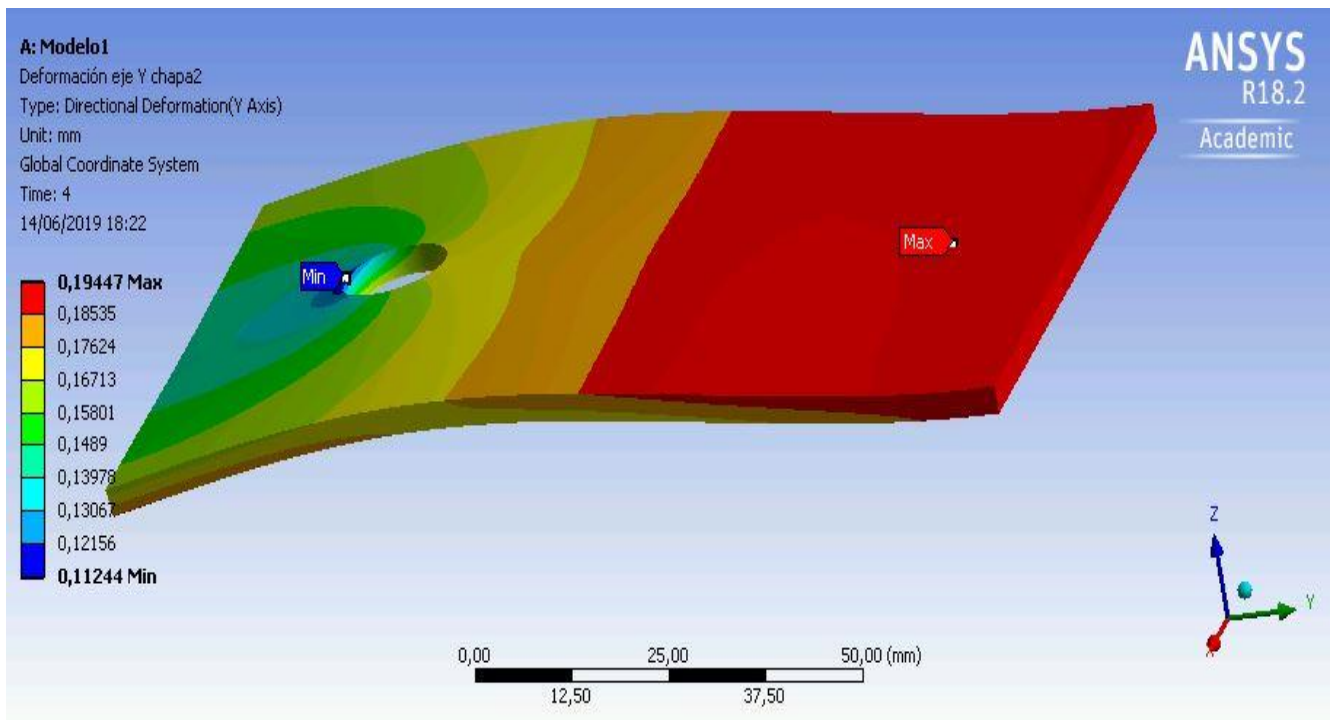


Figura 38. Deformación chapas parte superior chapa2 por aplastamiento

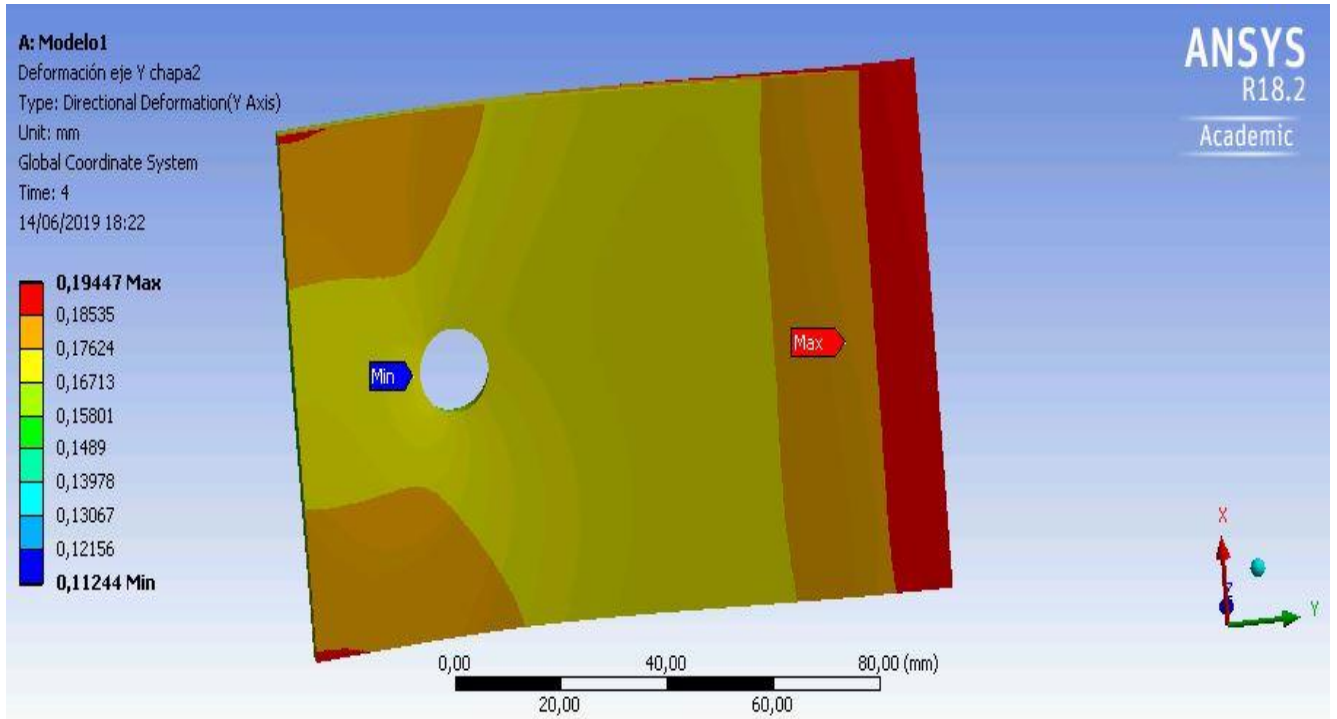


Figura 39. Deformación chapas parte inferior chapa2 por aplastamiento

4.3.2. Tensión de Von Mises

4.3.2.1. Tensión de Von Mises del conjunto

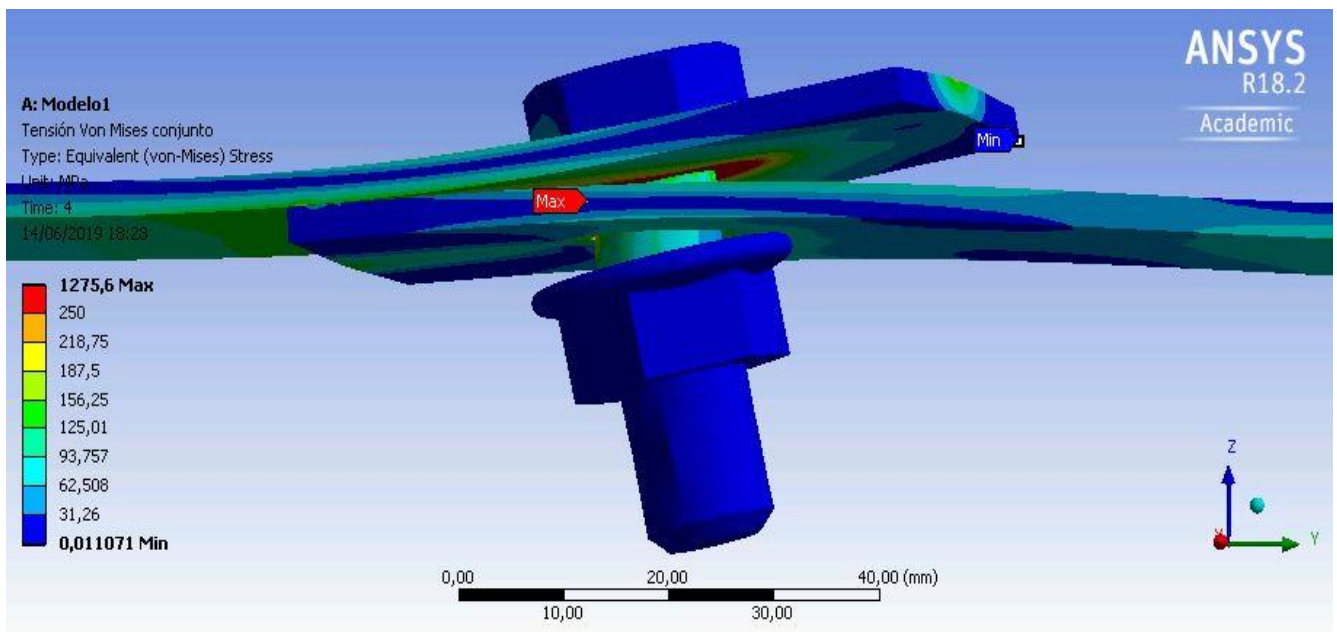


Figura 40. Tensión Von Mises conjunto por aplastamiento

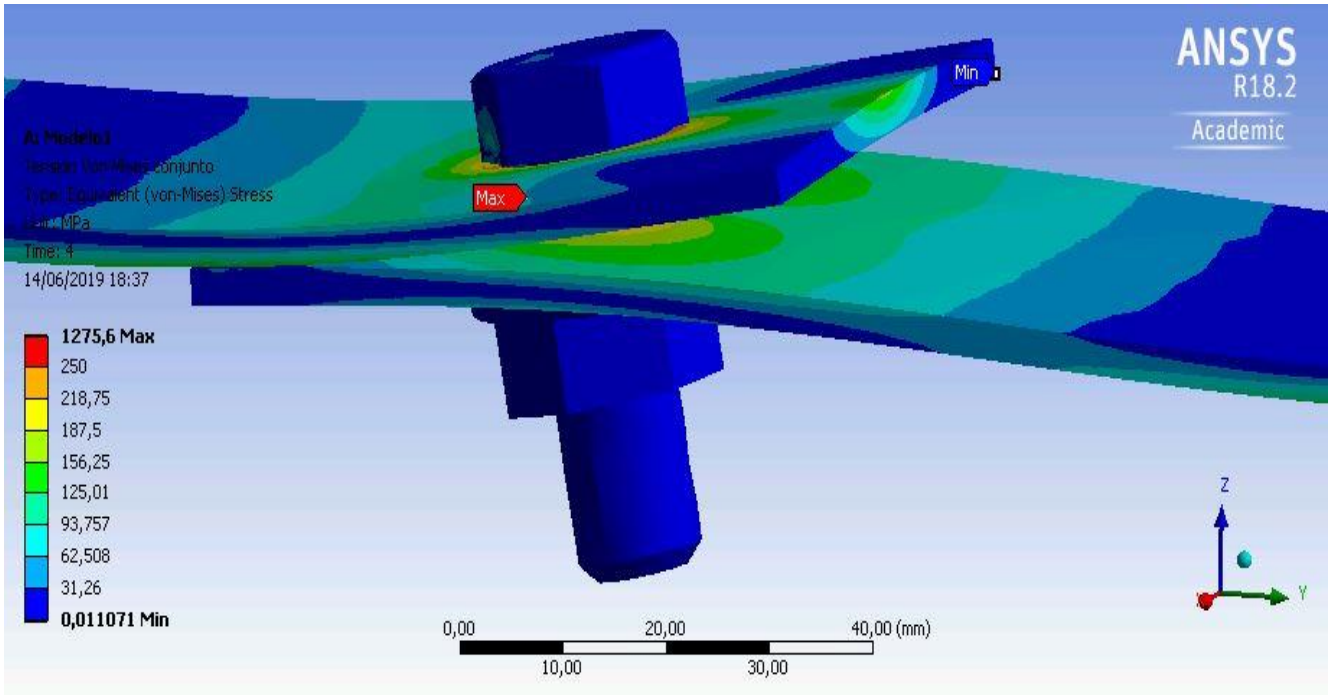


Figura 41. Otra perspectiva de la tensión de Von Mises del conjunto por aplastamiento

4.3.2.2. Tensión de Von Mises en las chapas

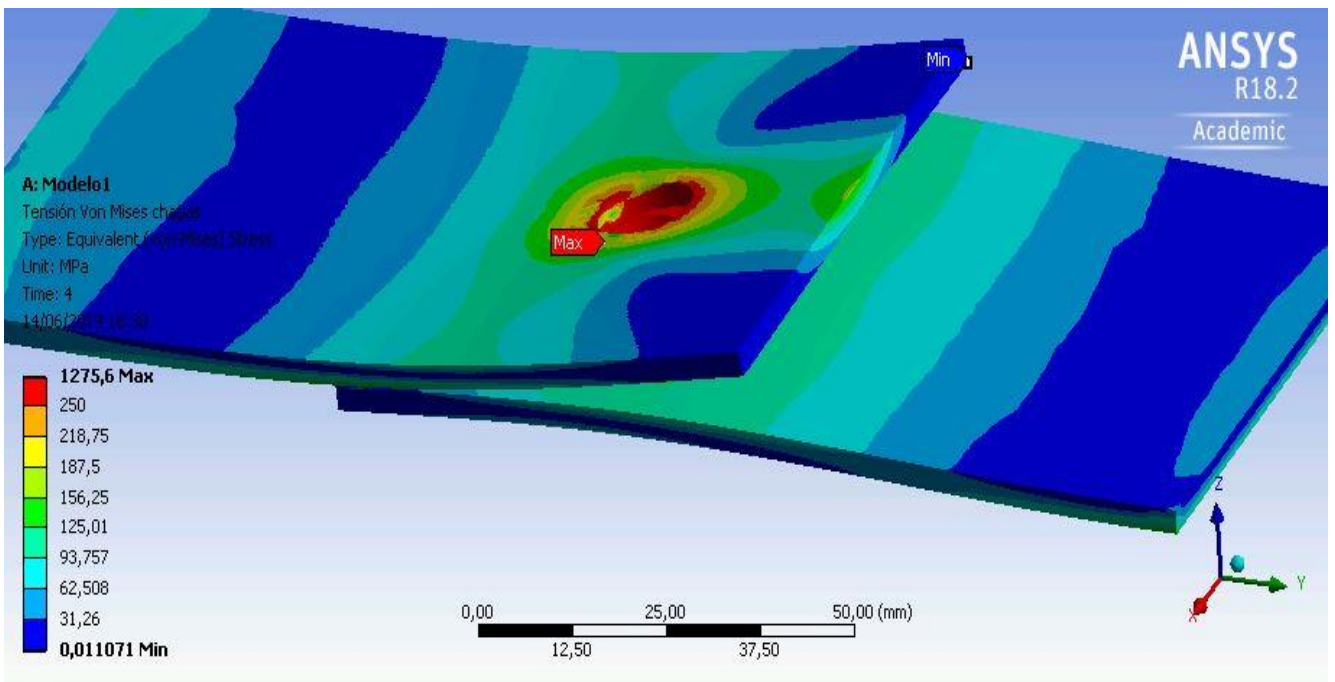


Figura 42. Tensión Von Mises parte superior chapas por aplastamiento

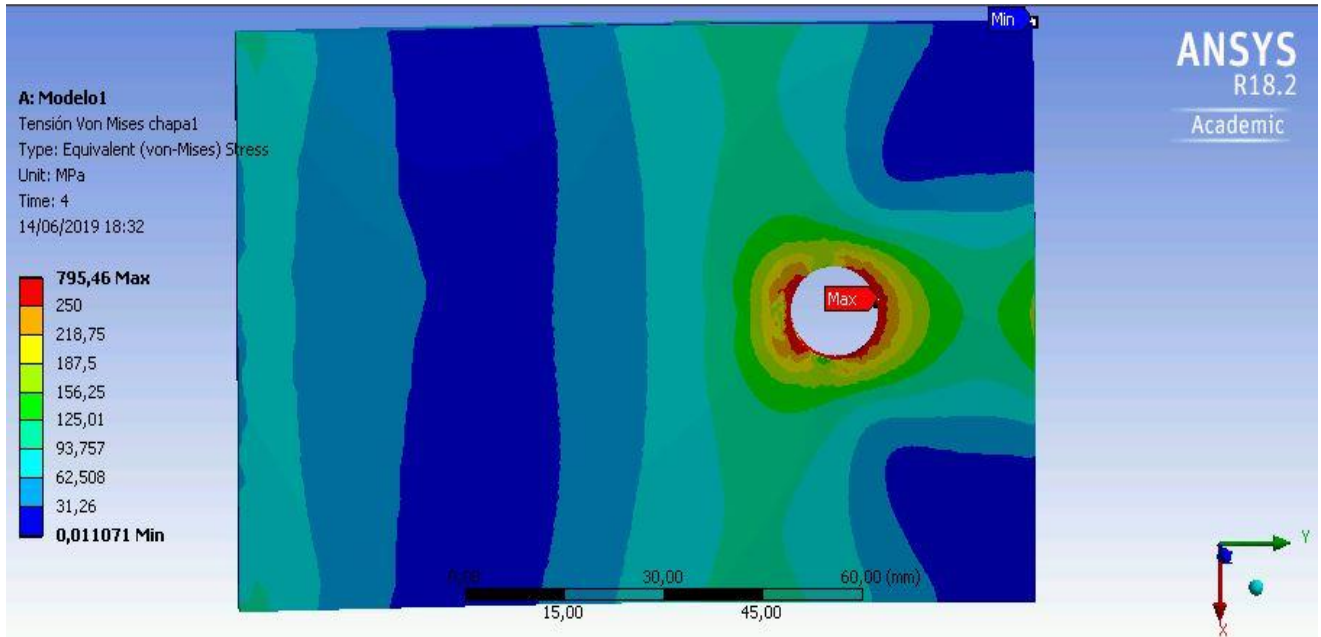


Figura 43. Tensión Von Mises parte superior chapa1 por aplastamiento

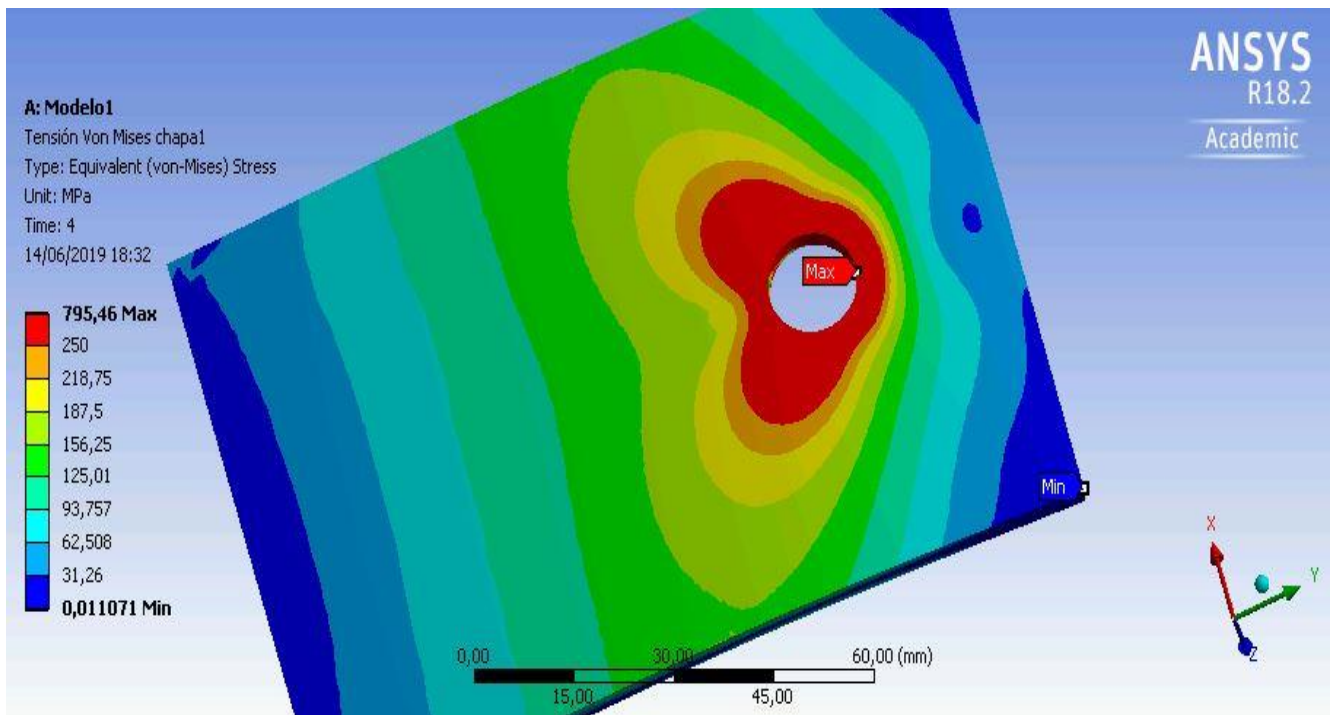


Figura 44. Tensión Von Mises parte inferior chapa1 por aplastamiento

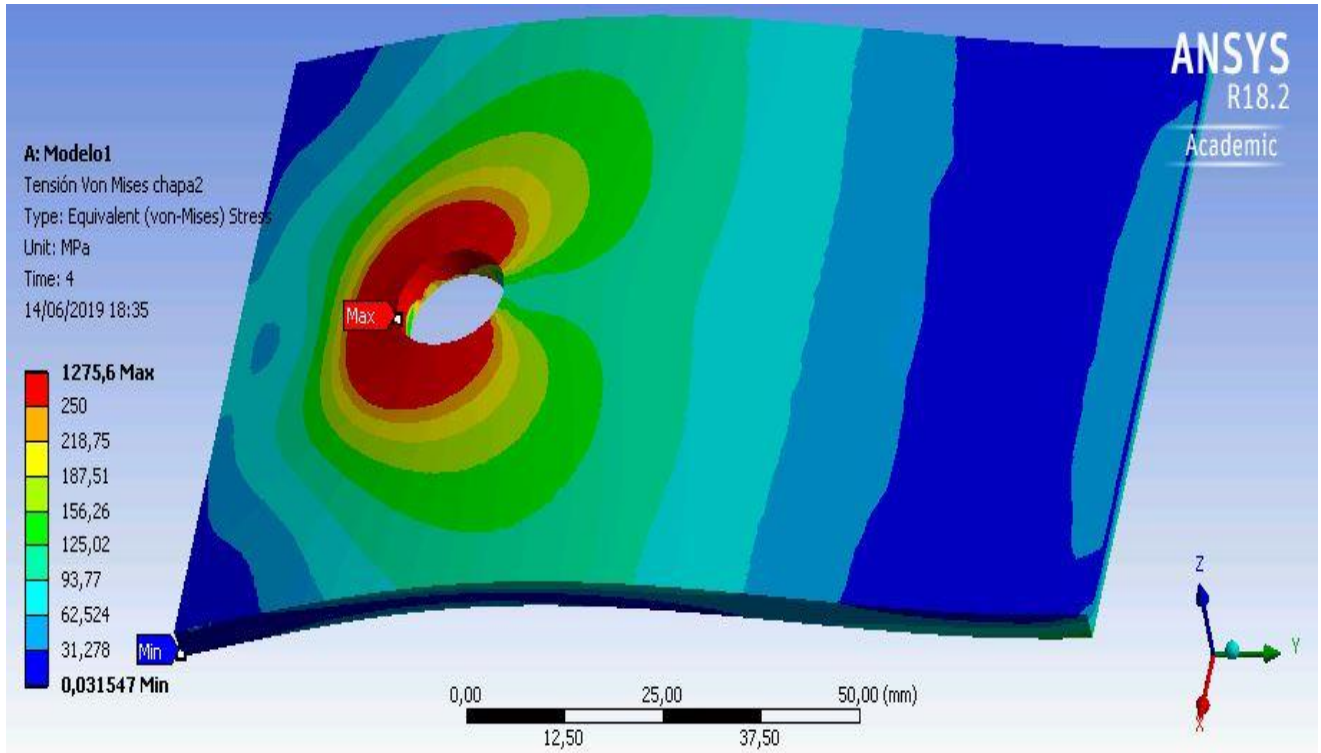


Figura 45. Tensión Von Mises parte superior chapa2 por aplastamiento

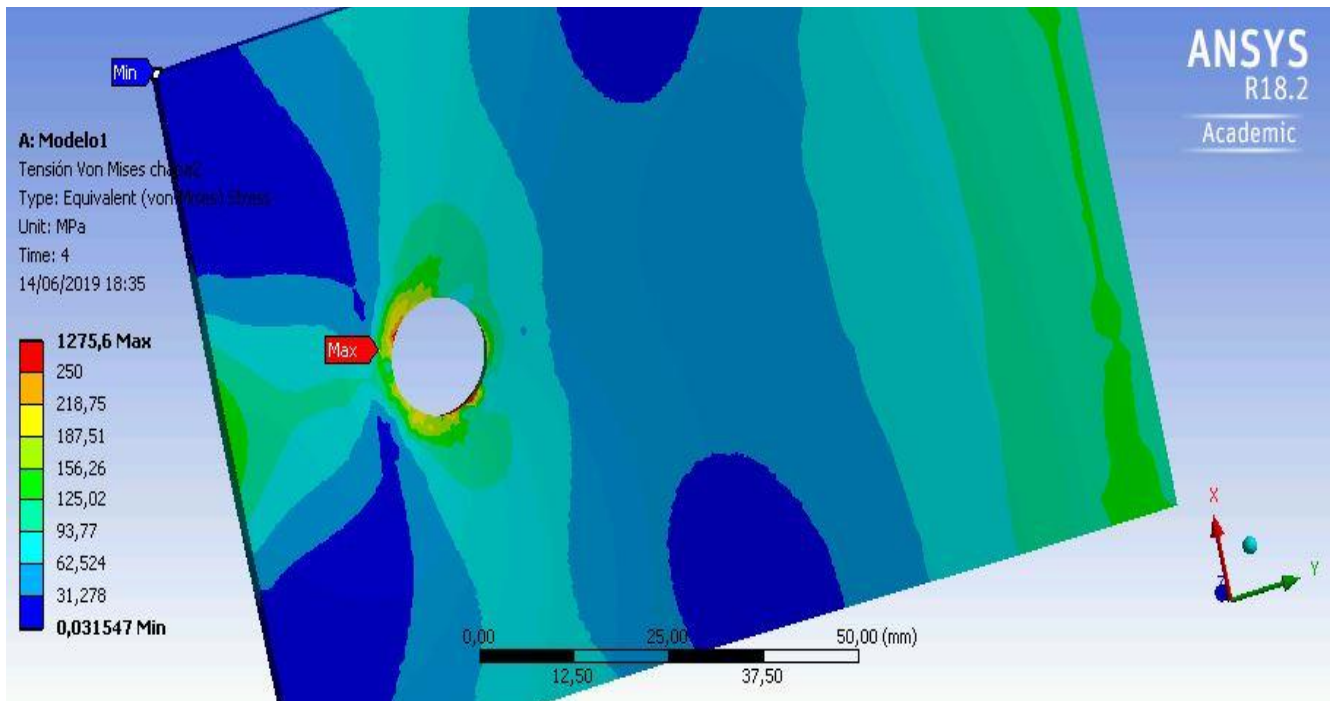


Figura 46. Tensión Von Mises parte inferior chapa2 por aplastamiento

4.3.3. Tensiones normales

4.3.3.1. Tensión normal del conjunto

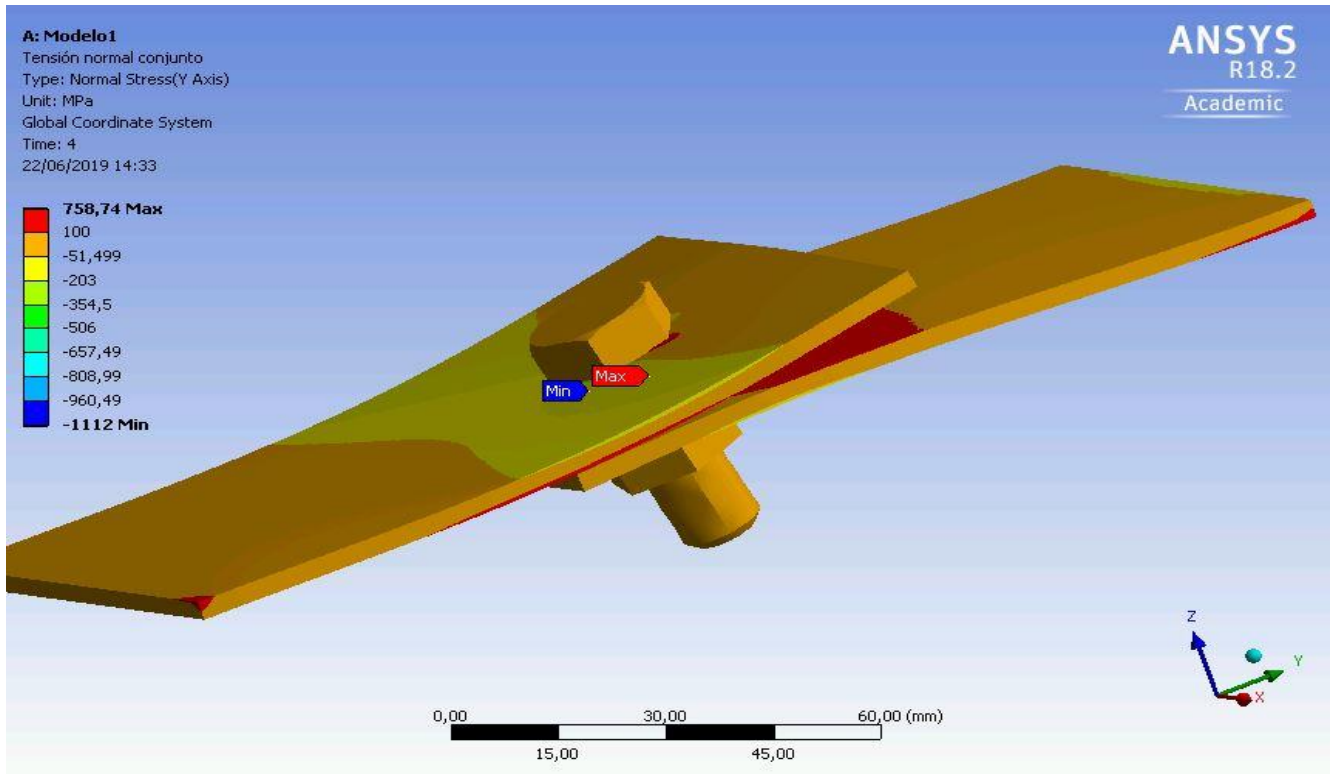


Figura 47. Tensión normal del conjunto por aplastamiento

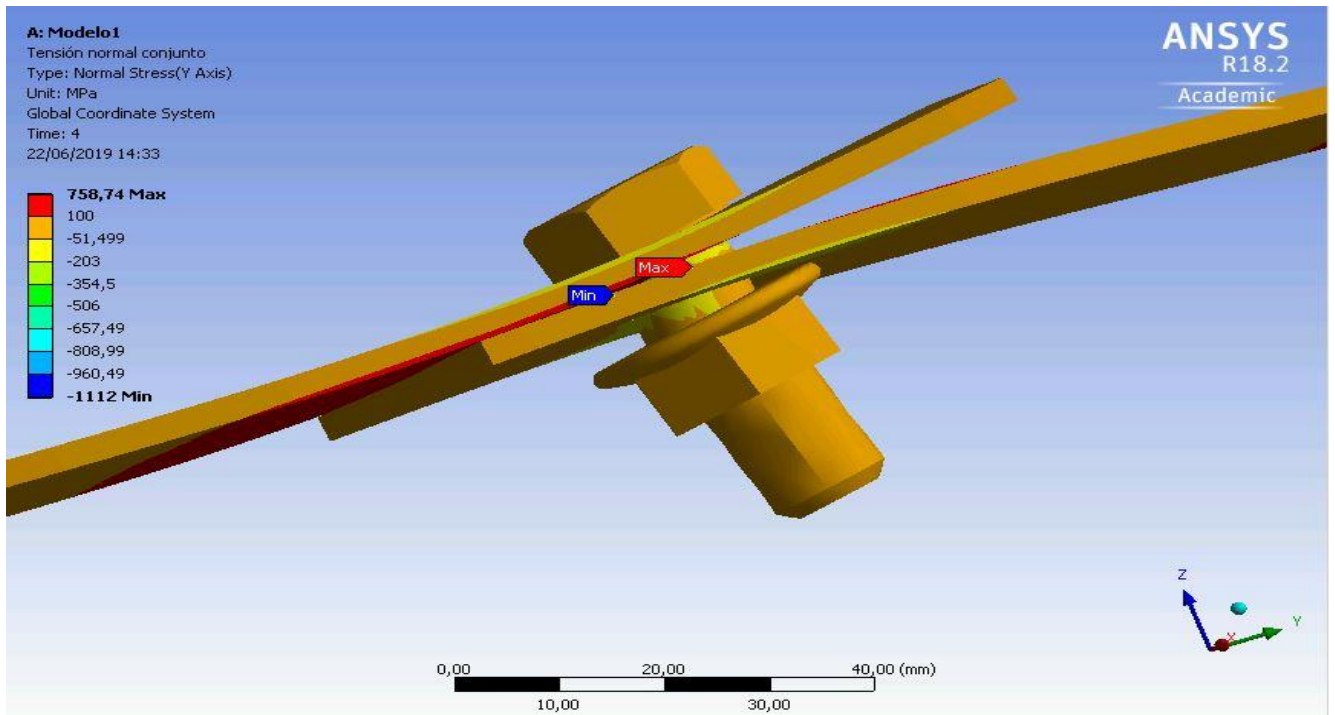


Figura 48. Otra perspectiva de la tensión normal del conjunto por aplastamiento

4.3.3.2. Tensión normal en las chapas

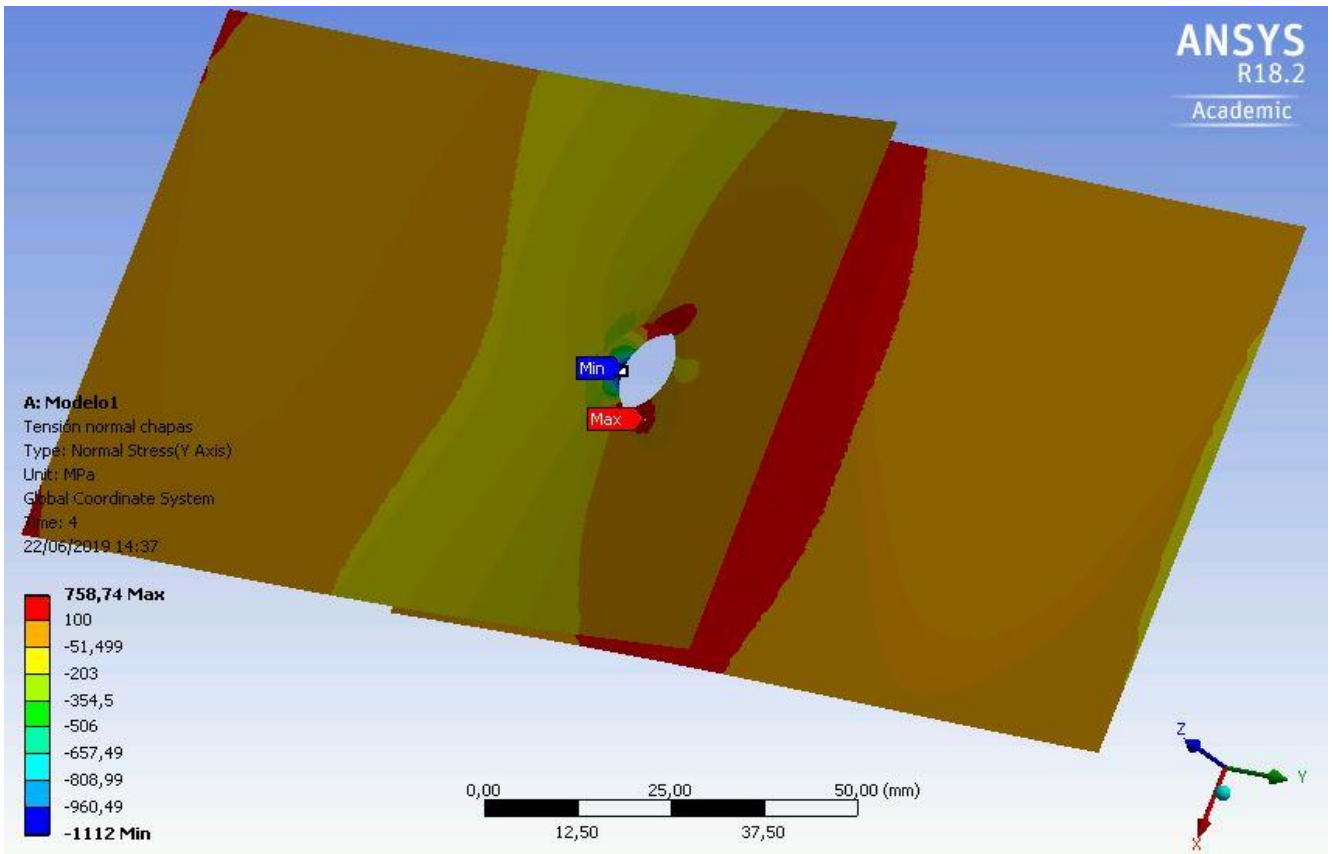


Figura 49. Tensión normal en las chapas por aplastamiento

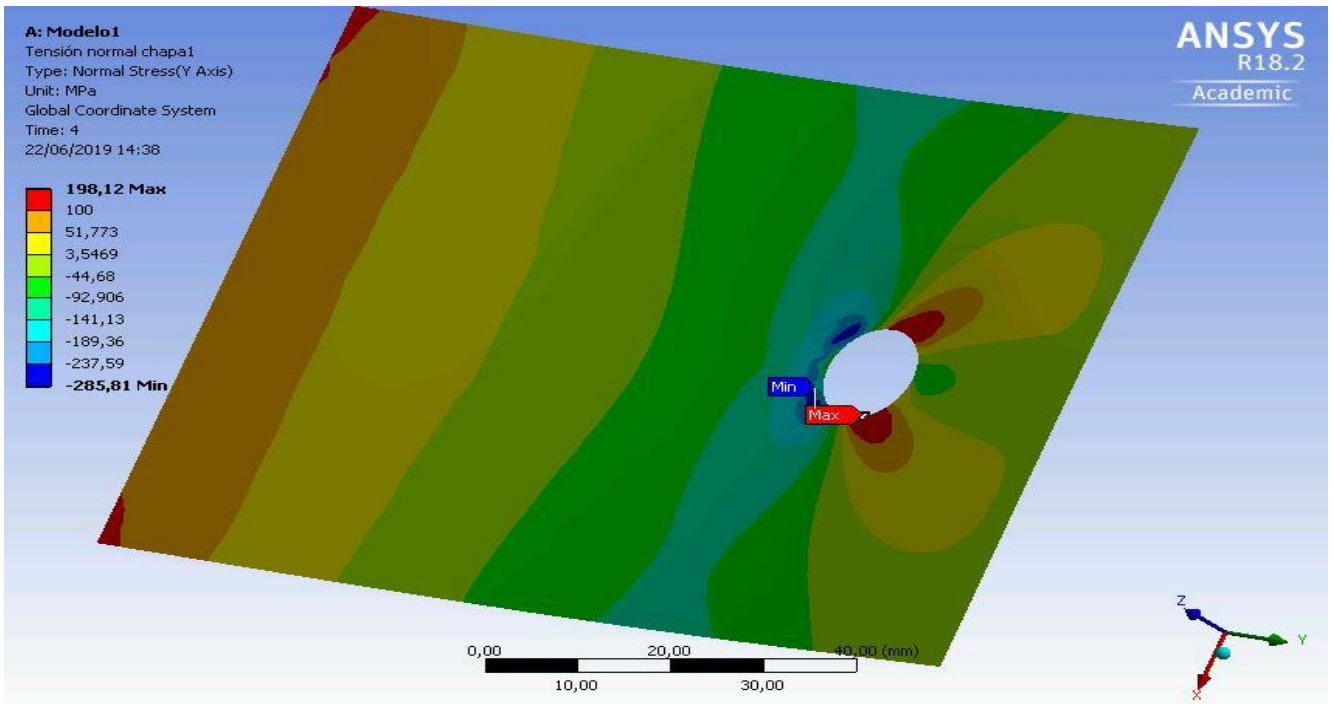


Figura 50. Tensión normal en la chapa1 por aplastamiento

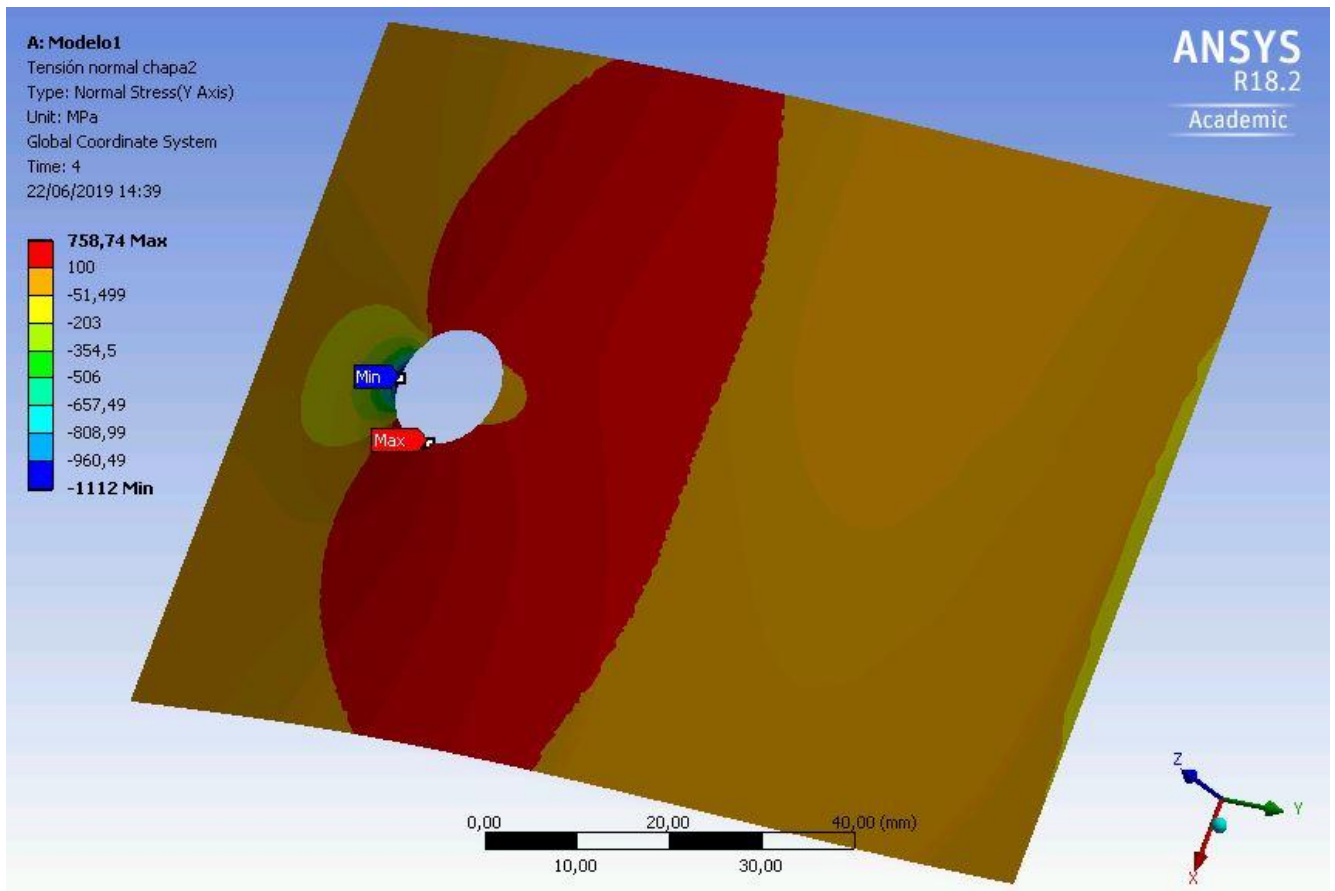


Figura 51. Tensión normal en la chapa2 por aplastamiento

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

Una vez analizados los resultados obtenidos, se mostraría acto seguido las exposiciones finales:

5.1. Programa de cálculo

Personalmente, me ha parecido una herramienta potente pero muy laboriosa, cuya aplicación al caso que nos ocupa debe realizarse teniendo en cuenta múltiples aspectos, tales como: el tamaño de malla, los incrementos en el método de resolución de *Newton-Raphson*, las propiedades de los contactos, el empleo de pasos de carga, la activación de parámetros técnicos como el *weak springs*, etc.

Para la obtención de resultados, al trabajar con un comportamiento no lineal y al haber cálculos tan complejos, el tiempo de resolución para cada modelo solía ser bastante elevado (un promedio de 6,7 horas aproximadamente). De hecho, cuando se realizaba algún tipo de prueba en el modelo (modificando las condiciones de contorno), se corría el riesgo de que al cabo de tantísimas horas de simulación el programa no pudiese llegar a converger.

5.2. Método de cálculo propuesto por el Eurocódigo 3

Los métodos de cálculo propuestos por el EC3 para obtener los tipos de resistencia protagonistas las cumple correctamente, siendo seguros para realizar la simulación con garantías (a simple vista).

5.3. Comportamiento de la unión atornillada

5.3.1. Modos de fallo

❖ Fallo por aplastamiento: un ejemplo ilustrativo para explicar este tipo de fallo sería observando la figura 52.

En la realidad, la chapa rompería (pasaría a la zona plástica) dejando un hueco importante desde el agujero hasta el extremo más cercano al mismo.

En el programa de elementos finitos, la chapa aparecería deformada en la región que aparece en color rojo (donde las tensiones producidas en ese lugar superan el límite elástico del acero estructural empleado en la simulación):

- En la zona del extremo de la chapa más cercana al agujero (coincidente con la trayectoria de rotura).
- En el contorno del agujero perteneciente al área de rotura de la chapa.

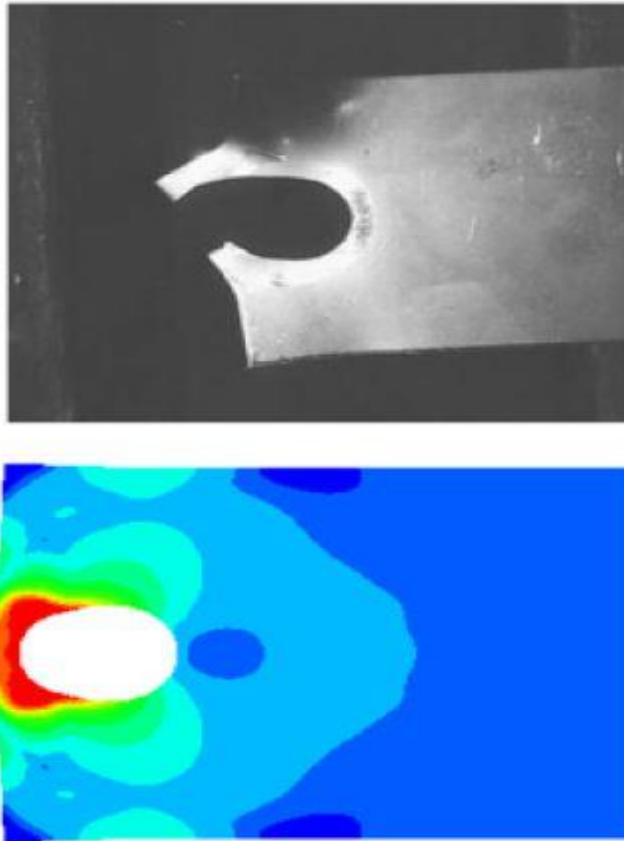


Figura 52. Resultado de un ensayo de laboratorio (arriba) y en el programa de elementos finitos mediante la tensión de Von Mises (abajo) para un fallo por aplastamiento

❖ Fallo por área neta: análogamente al caso anterior, un ejemplo ilustrativo para explicar este tipo de fallo sería observando la figura 53.

Durante el ensayo de laboratorio, la chapa dejaría una grieta por el camino más corto desde el agujero hasta el final de la chapa. En comparación con la chapa del modelo, la grieta iría por la zona perpendicular al extremo más cercano al agujero.

En el programa de elementos finitos, la chapa aparecería deformada en la región que aparece en color rojo (donde las tensiones producidas en ese lugar superan el límite elástico del acero estructural empleado en la simulación):

- En la zona donde se produce la trayectoria de rotura.
- En el contorno del agujero donde se produce el contacto tras efectuarse las condiciones de borde.

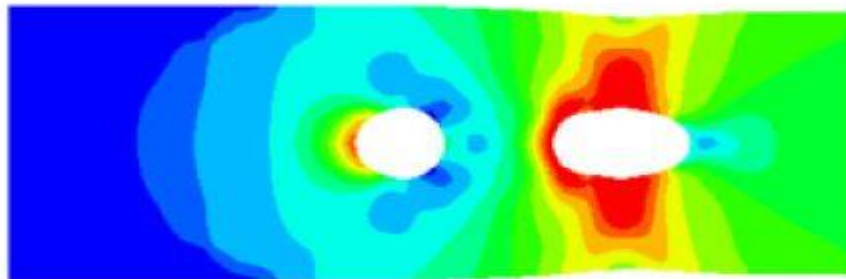
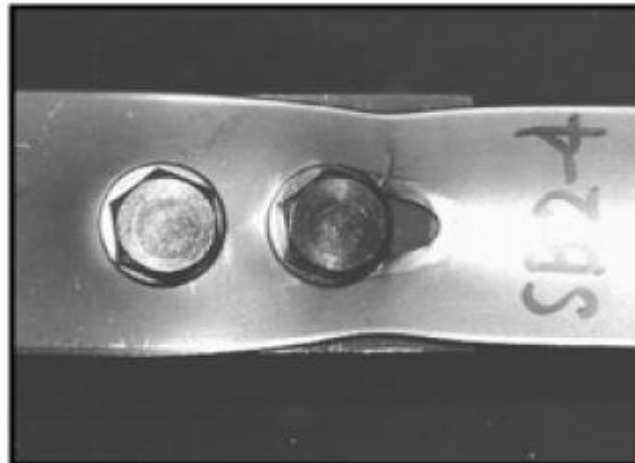


Figura 53. Resultado de un ensayo de laboratorio (arriba) y en el programa de elementos finitos mediante la tensión de Von Mises (abajo) para un fallo por área neta

Dado que la chapa tiene suficiente anchura, se descartaría este fenómeno de fallo.

5.3.2. Comparativas numérica y experimental

En vista a los resultados para ambos fenómenos, habría que mejorar el modelo que se acaba de describir por los siguientes motivos:

- I. La curva fuerza-deformación teórica (facilitada por el departamento I+D de NoegaSystems) no coincide en absoluto con la curva fuerza-deformación resultante del modelo. Esto puede ser debido a que hay muy poco contacto entre ambas chapas mientras se lleva a cabo los fenómenos descritos con las condiciones de contorno prefijadas: en la figura 54 se ilustraría perfectamente, habiendo un área de contacto final escasa entre un elemento y otro.
- II. Al ser una chapa con un único tornillo, en el Eurocódigo está penalizado porque al hallar la fuerza de aplastamiento no se tiene en cuenta la resistencia teórica total (sólo se tiene en cuenta el 80% del total): esta aclaración se nota porque la chapa que está en la parte superior aparece como un poco “enrollada”, en lugar de estar “doblada” (véase figura 55).

Una solución para mitigar los dos primeros motivos es diseñar una unión atornillada doble con una única fila (figura 56). El único problema llegaría si el software de elementos finitos no encuentra

una solución porque la dificultad al realizar la simulación sería mayor en comparación a la propuesta durante el presente trabajo.

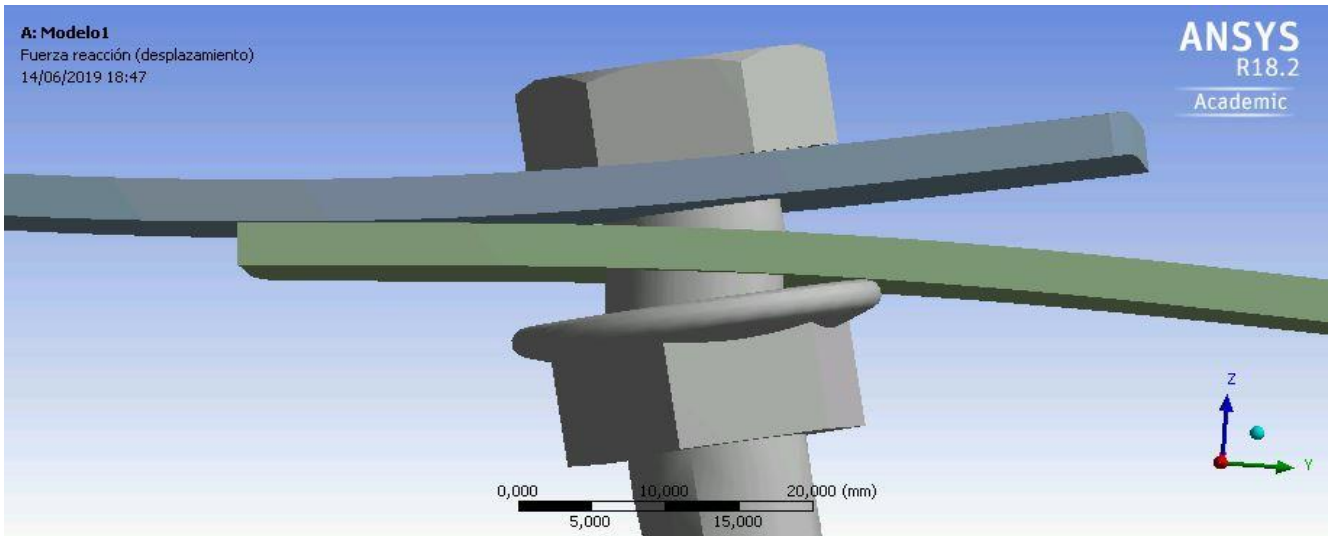


Figura 54. Comportamiento de la unión atornillada final

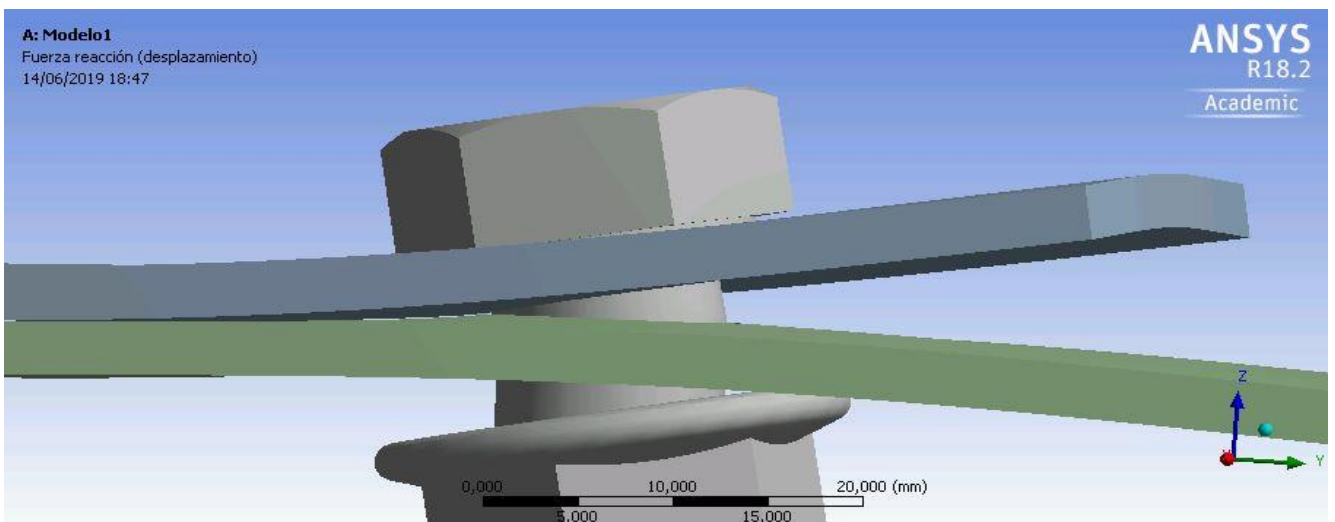


Figura 55. Inciso penalización del EC3

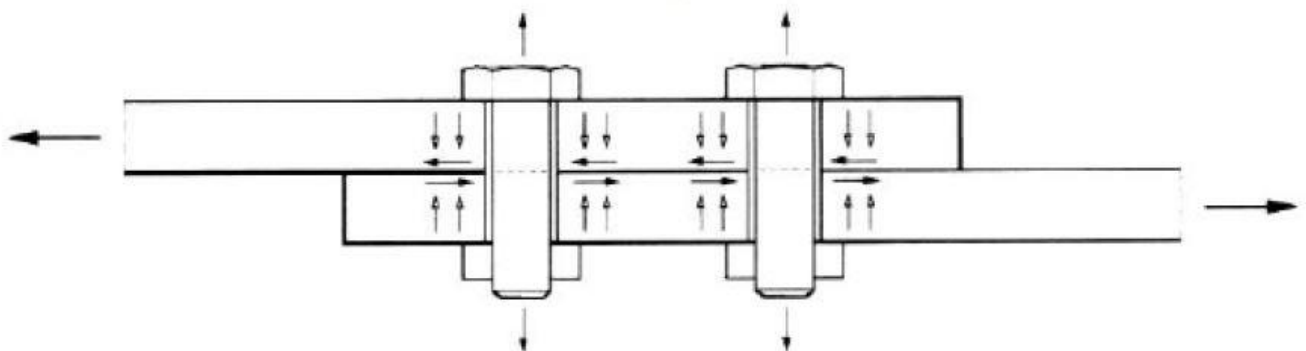


Figura 56. Posible solución para asegurarse el problema de contacto entre chapas

Por otro lado, al margen de los motivos citados anteriormente, otra conclusión relevante en buscar un razonamiento al objetivo del TFM podría ser que la distancia que hay entre el vástago del tornillo y el diámetro del perforado no sea equidistante (en comparación entre un modelo real y un modelo experimental): es muy complicado que haya la misma distancia en ambas situaciones debido a que se puede cometer errores de unas pocas décimas de milímetros (o incluso milésimas de milímetros) sin darse cuenta al pretensar el tornillo o al montar todas las uniones.

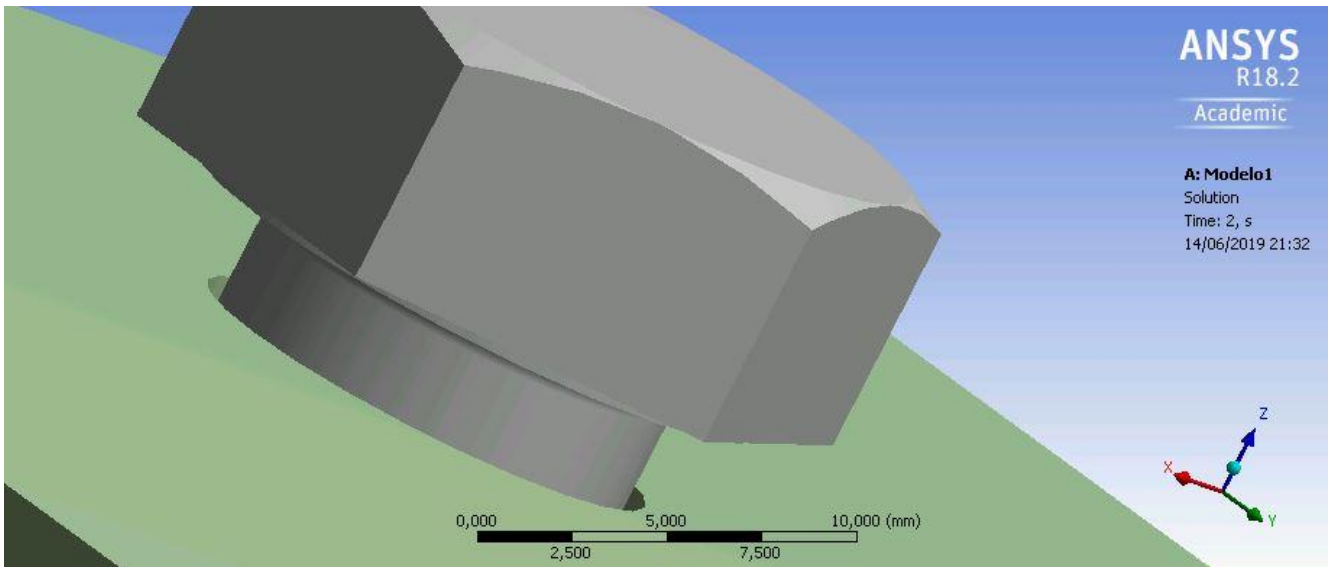


Figura 57. Imagen entre el diámetro del perforado y el diámetro del vástago

Por último, analizando las tensiones normales del presente trabajo, se observan síntomas similares a la trayectoria de una posible rotura a medida que aumente el desplazamiento de la unión. Esta conclusión se ilustraría en la figura inferior, habiendo una zona en los lados superiores del agujero perforado que se acercaría a la tensión del límite elástico de la chapa:

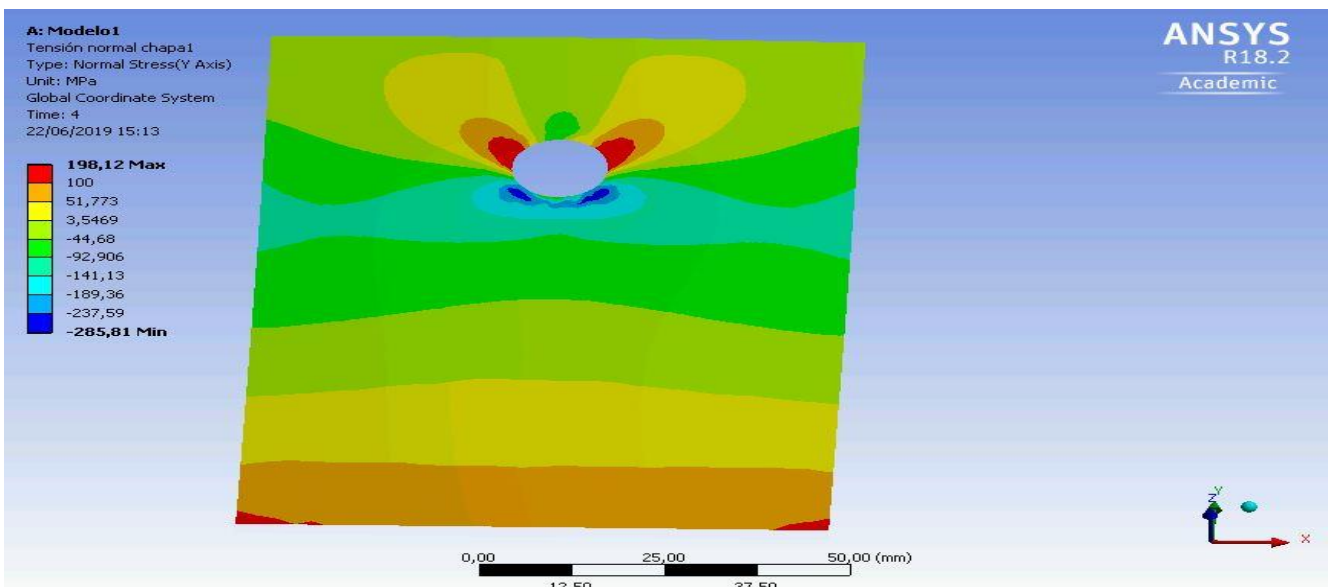


Figura 58. Detalle de la chapa del soporte fijado en el modelo

5.4. Futuras líneas de investigación

Este proyecto de investigación podría ampliarse realizando los siguientes procedimientos:

1- Resolver varios modelos (realizando los mismos pasos citados durante el presente TFM, siempre y cuando el modelo sea viable) editando variables como:

- . El espesor de las chapas (de 5,10 o 20 mm)
- . La métrica del tornillo (M10 o M16)
- . El coeficiente de rozamiento (de 0,25 o 0,40), según diferentes acabados

2- Con todos los datos de las gráficas fuerza-deformación conseguidos, introducirlos en un software de análisis estadístico (como puede ser *Origin™*) con el fin de obtener una ecuación en el que se deduzca cuál es el dato que mayor efecto podría tener en la deformación de una unión atornillada.

CAPÍTULO 6: PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO

6.1. Planificación y programación

Para detallar la planificación y la programación del análisis no lineal de uniones metálicas se ha tomado como datos de partida los tiempos estimados para la realización de cada tarea y el orden de realización de cada una de ellas.

Cada semana consta de cinco días laborables. Cada día laborable tendrá una duración de ocho horas.

A continuación, se detallan las tareas realizadas a lo largo del proyecto y la duración de cada una de ellas (en días):

- Investigación del origen del proyecto y conocimientos previos.....19 días
- Recopilación de datos de partida.....4 días
- Realización de modelos geométricos en el *Solid Edge*.....8 días
- Aplicación del MEF mediante *ANSYS*:
 - ✓ Estudio previo del software.....13 días
 - ✓ Modelización y discretización de la unión en *Workbench*.....8 días
 - ✓ Aplicación de solicitaciones y obtención de resultados.....4 días
 - ✓ Análisis y modificaciones.....26 días
- Redacción de documentos, modificación de los mismos.....12 días

Sumando los tiempos parciales de cada tarea se tiene una duración total de proyecto de **94 días** (unas 13,5 semanas).

6.2. Diagrama de Gantt

En la siguiente página, aparecería representado gráficamente dos diagramas de Gantt mostrando la duración de todas las tareas:

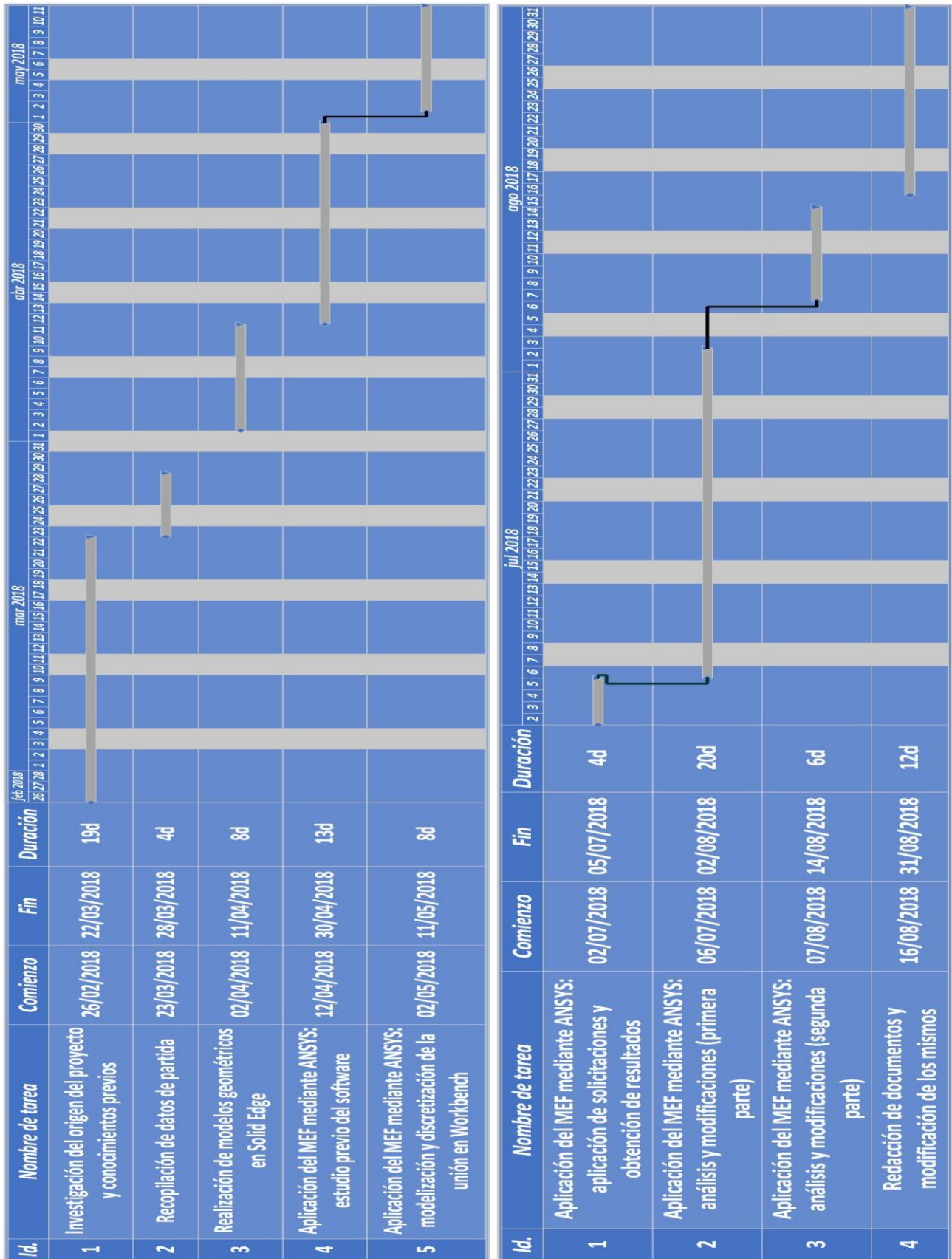


Figura 59. Diagramas de Gantt del TFM

CAPÍTULO 7: PRESUPUESTO

7.1. Introducción

Los distintos estudios mediante el método de los elementos finitos se han llevado a cabo mediante el software informático del programa ANSYS en su versión 15.0, lo que conlleva que una gran parte del presupuesto se deba a la licencia de dicho programa, así como al material informático necesario para su funcionamiento.

Además de este programa, se ha utilizado el programa de dibujo paramétrico Solid Edge en su versión ST10 para la realización del modelo a estudiar, lo que implica destinar otra parte del presupuesto a la licencia de este software.

Por otra parte, para la construcción de los diversos modelos y posteriormente, la obtención y aplicación de las condiciones de contorno, fuerzas a aplicar y parámetros de resolución han sido necesarias numerosas horas, a las que hay que sumar las horas que emplean cada uno de los programas en la resolución de cada uno de los casos: todo ello, acarrea un elevado número de horas de computación.

Finalmente, para la redacción de la memoria y anexos de este proyecto ha sido necesario disponer del hardware y el software necesario, tales como: papel, material fungible y diferentes programas de ofimática dentro del paquete de Microsoft Office 2013 o el sistema operativo Windows 10.

7.2. Cálculo de costes

El presupuesto puede ser desglosado en los siguientes apartados:

- Hardware
- Software
- Gastos de personal
- Material fungible
- Otros gastos

Cada uno de los apartados anteriores será tratado con una mayor profundidad en los siguientes puntos.

7.2.1. Hardware

En esta parte se tendrá en cuenta todo aquel material informático necesario que permite llevar a cabo este proyecto y cuya estimación de costes se realiza a partir de la expresión siguiente:

$$C_1 = \frac{C_T \cdot T_U \cdot U}{T_A \cdot 100}$$

En la fórmula anterior las abreviaturas tienen el siguiente significado:

- C_1 : coste del hardware
- C_T : coste de adquisición del hardware
- T_U : tiempo estimado de uso (en años)
- T_A : tiempo estimado de amortización (en años)
- U : utilización porcentual del equipo.

La duración total de este proyecto ha sido de 13,5 semanas, dentro de los cuales, algunos de los equipos han sido utilizados con mayor regularidad, mientras que otros se utilizaron en momentos puntuales.

En la siguiente tabla viene recogido el coste que significó el uso del ordenador como herramienta principal de trabajo:

| Hardware | C_T (€) | T_U (años) | T_A (años) | U (%) | C_1 (€) |
|--------------------|-----------|--------------|--------------|---------|--------------|
| Ordenador Intel | 2200 | 0,2596 | 4 | 70 | 99,95 |
| Gasto total | | | | | 99,95 |

Tabla 18. Coste por parte del hardware empleado

7.2.2. Software

En este subapartado se recogen todos aquellos programas informáticos necesarios para llevar a cabo el proyecto, es decir: para la modelización de las diferentes soluciones a estudiar, el posterior estudio por elementos finitos y finalmente para la redacción de documentos. La estimación de costes se realiza a partir de la siguiente expresión (análogamente al apartado anterior):

$$C_2 = \frac{C_T \cdot T_U \cdot U}{T_A \cdot 100}$$

Durante el desarrollo del proyecto se han utilizado diferentes programas, ya sea en algunos casos de forma exclusiva o en otros de forma alternativa.

En la siguiente tabla se desglosaría todos los gastos asociados a este punto:

| Software | C _T (€) | T _U (años) | T _A (años) | U (%) | C ₂ (€) |
|--------------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|-------|--------------------|
| Licencia ANSYS 15.0 | 35000 | 0,2596 | 3 | 30 | 908,6 |
| Licencia Microsoft Office 2013 | 1200 | 0,2596 | 3 | 30 | 31,15 |
| Licencia Windows 10 | 1800 | 0,2596 | 3 | 30 | 46,73 |
| Licencia de Solid Edge | 3000 | 0,2596 | 2 | 15 | 58,41 |
| Gasto total | | | | | 1044,89 |

Tabla 19. Coste por parte del software empleado

7.2.3. Gastos de personal

En este subapartado se tienen en cuenta todos los costes derivados de la remuneración al equipo humano.

Acto seguido, se desmembrarían cada uno de estos gastos, donde C₃ corresponde al coste total de cada uno de ellos.

| Personal | Coste unitario (€/h) | t (horas) | C ₃ (€) |
|------------------------------|----------------------|-----------|--------------------|
| Recogida de datos y análisis | 30 | 32 | 960 |
| Aprendizaje de los programas | 30 | 95 | 2850 |
| Realización de los modelos | 45 | 64 | 2880 |
| Análisis mediante M.E.F. | 50 | 320 | 16000 |
| Redacción de documentos | 45 | 90 | 4050 |
| Gasto total | | | 26740 |

Tabla 20. Coste por parte del personal

7.2.4. Material fungible

Se considerarían todos los gastos debidos al material necesario de escritorio y encuadernación.

Todos estos costes se pueden ver seguidamente, siendo C₄ el coste total de cada uno de ellos.

| Material fungible | C ₄ (€) |
|--------------------|--------------------|
| Papelería | 25 |
| Tinta | 30 |
| Encuadernación | 60 |
| Gasto total | 105 |

Tabla 21. Coste por material fungible

7.2.5. Otros gastos

En este punto se consideran costes de diversa índole y que no pudieron ser incluidos en ninguno de los apartados anteriores. Entre ellos pueden mencionarse conceptos tan diferentes como son telefonía, electricidad, conexión a internet, transporte, etc.

Para este concepto se establecerá una partida alzada de 350 € y vendrá reflejado por C₅.

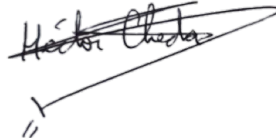
7.3. Coste total del proyecto

El gasto total se obtiene sumando los gastos recogidos en los cinco puntos anteriores, valor al que hay que sumar el beneficio industrial y por supuesto, el IVA.

| Concepto | Coste (€) |
|-----------------------------------------------|-----------------|
| Gastos de hardware (C ₁) | 99,95 |
| Gastos de software (C ₂) | 1044,89 |
| Gastos de personal (C ₃) | 26740 |
| Gastos de material fungible (C ₄) | 105 |
| Otros gastos (C ₅) | 350 |
| Coste bruto del proyecto | 28339,84 |
| Beneficio industrial (6%) | 1700,39 |
| Total | 30040,23 |
| IVA (21%) | 6308,45 |
| Coste total del proyecto | 36348,68 |

Tabla 22. Coste total del proyecto

Firmado:




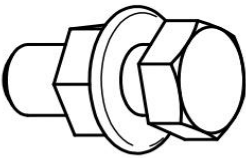
El proyectista

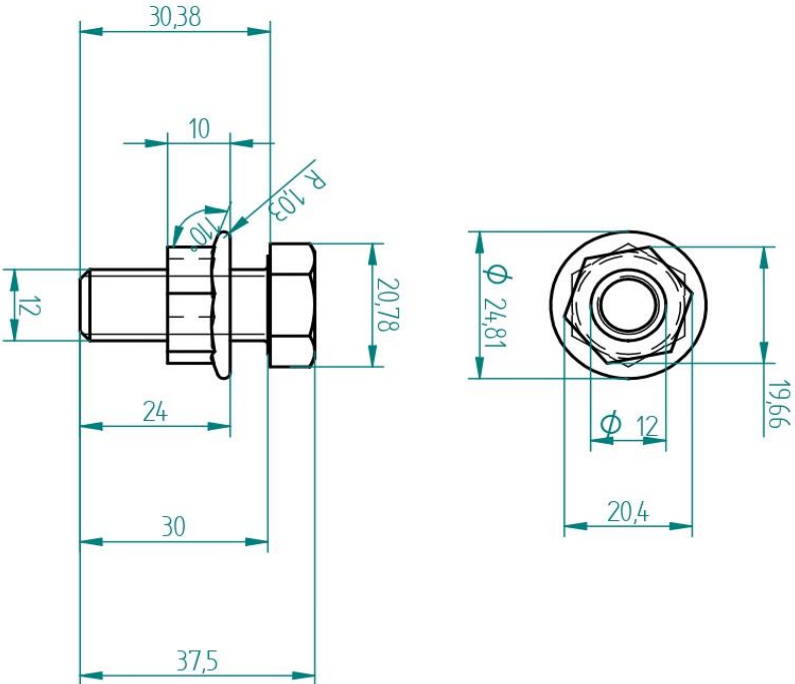
Gijón, 21 de junio de 2019


BIBLIOGRAFÍA

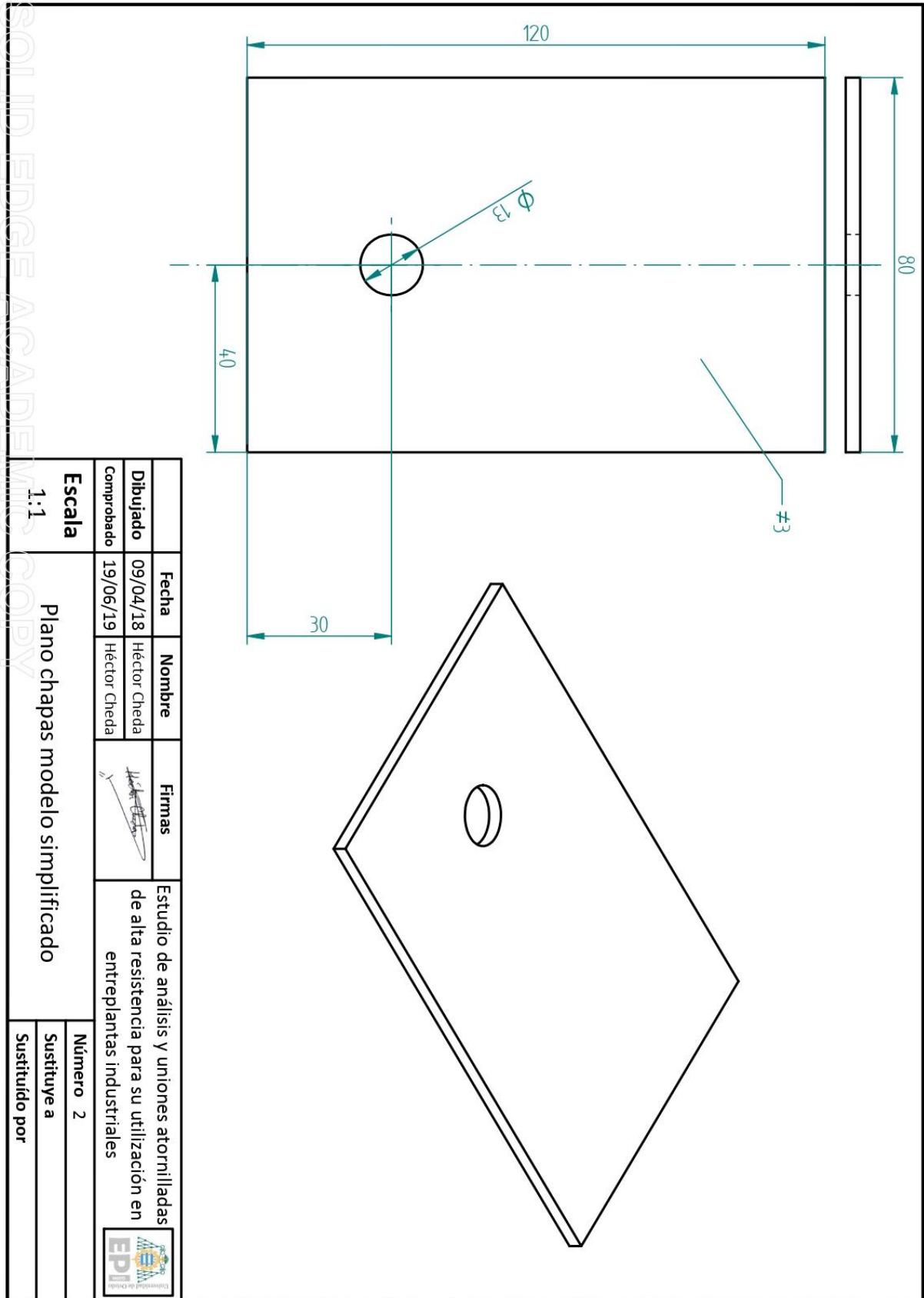
- AENOR. (2013). UNE-EN 1993-1-8:2013. *Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-8: uniones*. Madrid: AENOR.
- C. YOUNG W., G. B. (2009). *Roark's formulas for stress and strain*. McGraw-Hill.
- CAPELLÁN MIGUEL G., M. A. (2009). *Guía para el apriete de uniones de tornillos pretensados*. APTA.
- Catálogo 100 unidades/lote DIN 6923* . (28 de Enero de 2019). Obtenido de Aliexpress:
<https://es.aliexpress.com/item/100pcs-Lot-DIN6923-M3-Metric-Thread-304-Stainless-Steel-Hex-Flange-Nut-Hexagon-Nut-With-Flange/32333995908.html>
- Entreplantas*. (3 de Abril de 2019). Obtenido de Noegasystems: <https://www.noegasystems.com/estanterias-industriales/entreplantas>
- ORTIZ J, I. H. (2009). *Manual de uniones atornilladas laterales* . APTA.
- S.RAO, S. (2011). *The finite element method in engineering*. Recuperado el 19 de Marzo de 2018, de Easy engineering: <https://easyengineering.net/the-finite-element-method-in/>
- Tae Soo Kim, H. K. (11 de mayo de 2007). *Finite element modeling of bolted connections in thin-walled stainless steel plates under static shear*. Recuperado el 16 de mayo de 2019, de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263823107000766>
- Tornillos din 931*. (28 de Enero de 2019). Obtenido de Macgp: <https://www.macgp.es/tornilleria/tornillos/din-931-1/>
- Varios. (s.f.). *Universidad de la Coruña*. Recuperado el 13 de Mayo de 2019, de http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_itop/411/contenido_publico/recursos/tema07.pdf
- VARIOUS. (2010). *ANSYS Mechanical Structural Nonlinearities lecture 3: introduction to contact*. Recuperado el 22 de Marzo de 2018, de Wenku Baidu: <https://wenku.baidu.com/view/c3f4de01011ca300a7c39035.html>
- VARIOUS. (2010). *Introduction to ANSYS Mechanical lecture 4: Meshing*. Recuperado el 21 de Marzo de 2018, de Academia edu: https://www.academia.edu/23721137/Introduction_to_ANSYS_Introduction_to_ANSYS_Mechanical_Introduction_to_ANSYS_Mechanical

ANEXOS



| | | | | | | | |
|----------------------|----------|------------------------------------------------------------------|----------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dibujado | 11/04/18 | Fecha | 11/04/18 | Nombre | Héctor Cheda | Firmas | Estudio de análisis y uniones atornilladas de alta resistencia para su utilización en entrepantallas industriales |
| Comprobado | 19/06/19 | | | Héctor Cheda |  | | |
| Escala 1:1 | | Plano tornillo DIN 931 y tuerca DIN 6923 del modelo simplificado | | | | | |
| Número 1 | | Sustituye a | | | | | |
| Sustituido por | | Sustituido por | | | | | |



| | | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Escala 1:1 | Fecha 11/04/18 | Nombre Héctor Cheda | Firmas | Estudio de análisis y uniones atornilladas de alta resistencia para su utilización en entreplantas industriales | |
| Dibujado Comprobado | 11/04/18 19/06/19 | Héctor Cheda Héctor Cheda | | | |
| Plano del conjunto chapas y tornillo-tuerca del modelo simplificado | | | | Número 3 | |
| | | | | Sustituye a | |
| | | | | Sustituido por | |