



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

Trabajo Fin de Grado
CURSO 2019/2020

Estudio numérico de la unión de casquillo para correas esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en frío.

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNA/O

Pablo José Rama Ferradás

TUTORAS/ES

Ruth María Gutiérrez Fernández

FECHA

SEPTIEMBRE 2020

ÍNDICE GENERAL

Título y resumen

Documento I. Memoria

Documento II. Planos

TÍTULO Y RESUMEN

ESTUDIO NUMÉRICO DE LA UNIÓN DE CASQUILLO PARA CORREAS ESBELTAS DE MÚLTIPLES VANOS EN ACERO CONFORMADO EN FRÍO.

El uso de la estructura de acero conformado representa un porcentaje cada vez mayor de la construcción en estructura metálica debido principalmente a sus propiedades: relación resistencia – peso favorable, ligereza, facilidad de fabricación y montaje y capacidad de innovar en su implementación. Este trabajo tiene como objetivo el estudio numérico de la unión de casquillo para correas de múltiples vanos. Se trata de un tipo de unión conveniente para conectar perfiles de sección en Z, facilitando el proceso de montaje de las correas de múltiples vanos consiguiendo reducir tiempos y costes de ejecución. El estudio numérico considera un tipo de correa esbelta con diferentes conexiones de casquillo, variando su longitud de solape. A partir de la simulación de un ensayo experimental, de tres puntos de carga, donde se inducen los esfuerzos reales que sufre una correa de la estructura secundaria en el cerramiento de naves industriales bajo carga gravitatoria seremos capaces de obtener y estudiar el comportamiento de la unión.

El principal objetivo del trabajo será capturar el comportamiento de las uniones estudiadas, así como su rigidez, su resistencia y el modo de fallo. Este estudio es aplicable en el rango elástico, que es la zona habitual de diseño. En él se caracteriza el comportamiento semirrígido de las uniones de casquillo y se desarrolla en el marco de un proceso de mejora de estos sistemas estructurales. Se trata además de un ámbito de creciente interés y aplicabilidad, donde se busca la automatización y optimización del diseño de las correas de múltiples vanos.

ESTUDO NUMÉRICO DA UNIÓN DE CASQUILLO PARA CORREAS ESVELTAS DE MÚLTIPLES VANS EN ACEIRO CONFORMADO EN FRÍO.

O uso da estrutura de aceiro conformado representa unha porcentaxe cada vez maior da construción en estrutura metálica debido principalmente ás súas propiedades: relación resistencia – peso favorable, lixeireza, facilidade de fabricación e montaxe e capacidade de innovar na súa implementación. Este traballo ten como obxectivo o estudo numérico da unión de casquillo para correas de múltiples vans. Trátase dun tipo de unión conveniente para conectar perfís de sección en Z, facilitando o proceso de montaxe das correas de múltiples vans conseguindo reducir tempos e custos de execución. O estudo numérico considera un tipo de correa esvelta con diferentes conexións de casquillo, variando a súa lonxitude de solape. A partir da simulación dun ensaio experimental, de tres puntos de carga, onde se inducen os esforzos reais que sofre unha correa da estrutura secundaria no cerramento de naves industriais baixo carga gravitatoria seremos capaces de obter e estudar o comportamento da unión.

O principal obxectivo do traballo será capturar o comportamento das unións estudadas, así como a súa rixidez, a súa resistencia e o modo de fallo. Este estudo é aplicable no rango elástico, que é a zona habitual de deseño. Nel caracterízase o comportamento semirrígido das unións de casquillo e desenvólvese no marco dun proceso de mellora destes sistemas estruturais. Trátase ademais dun ámbito de crecente interese e aplicabilidade, onde se busca a automatización e optimización do deseño das correas de múltiples vans.

NUMERICAL STUDY OF THE SLEEVE JOINT FOR SLENDER MULTISPAN PURLINS IN COLD FORMED STEEL.

The use of conformed steel structure represents an increasing percentage of the metal structure construction, due to its advantages such as a favorable strength-weight ratio, lightness, ease of manufacturing and assembly and the possibility of introducing innovation. The objective of this project is the numerical study of the sleeve joint for multi-span purlins. This joint is a convenient way to connect Z-section profiles since it facilitates the assembly process of multi-span purlins, reducing execution times and costs. The numerical study considers a type of slender purlins with different sleeve joints, varying the overlap length. The behavior of the joint is obtained by simulating the experimental test of three load points, which induces in the joint the real stresses suffered by a purlin of the secondary structure in the enclosure of industrial buildings under gravitational load.

The main objective of the project is to capture the behavior of the joints studied, that is, their stiffness, strength and failure mode. This study, applicable in the elastic range that is the usual design area, characterizes the semi-rigid behavior of the bushing joints and is carried out within the framework of a process of improvement of these structural systems, in an area of increasing interest and applicability, which enable automation and design optimization of multi-span purlins.



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

**TRABAJO FIN DE GRADO
CURSO 2019/2020**

*Estudio numérico de la unión de casquillo para correas
esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en
frío.*

Grado en Ingeniería Mecánica

Documento I

MEMORIA

ÍNDICE.

1. Antecedentes y objetivos.	4
2. Especificaciones de diseño.	6
3. Diseño del sistema:	7
3.1 <i>Estudio de soluciones.</i>	7
3.2 <i>Cálculos.</i>	9
3.3 <i>Simulación.</i>	11
4. Implementación física:	14
4.1 <i>J16</i>	14
4.2 <i>J17</i>	21
4.3 <i>J18</i>	25
4.4 <i>Comparación entre los tres modelos</i>	28
5. Protocolo de pruebas. Rediseño.	31
6. Resultados obtenidos.	33
7. Estudio de aplicabilidad:	37
7.1 <i>Aplicación del prototipo.</i>	37
7.2 <i>Comparación con sistemas ya existentes.</i>	38
8. Costes	39
9. Conclusiones.	40
10. Bibliografía.	41

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Comparación entre unión por solape (arriba) y unión de casquillo (abajo). Fuente: elaboración propia	4
Figura 2. Diagrama de momentos flectores para una viga continua con múltiples apoyos, con carga distribuida. Fuente: elaboración propia	6
Figura 3. Diagrama de momentos flectores del ensayo. Fuente: elaboración propia ..	6
Figura 4. Modelado J11. Fuente: elaboración propia	7
Figura 5. Ejemplo de <i>smooth step</i> . Fuente: elaboración propia	9
Figura 6. Representación de energía cinética (ALLKE) y de energía interna de deformación (ALLIE). No es cuasiestático. Fuente: elaboración propia	12
Figura 7. Representación de energía cinética (ALLKE) y de energía interna de deformación (ALLIE). Si es cuasiestático. Fuente: elaboración propia	12
Figura 8. Representación fuerza – desplazamiento para el modelo final. Fuente: elaboración propia	13
Figura 9. Resultados del ensayo real. Fuente: <i>Numerical study of purlin joints with sleeve connections</i>	13
Figura 10. Representación de energía cinética (ALLKE) y de energía interna de deformación (ALLIE) para el modelo J16. Fuente: elaboración propia	14
Figura 11. Tensiones de Von Mises en el modelo J16. Fuente: elaboración propia ...	15
Figura 12. Curvas fuerza - desplazamiento para el modelo J16. Fuente: elaboración propia	18
Figura 13. Planteamiento para el cálculo de la rotación relativa (I). Fuente: elaboración propia	19
Figura 14. Planteamiento para el cálculo de la rotación relativa (II). Fuente: elaboración propia	19
Figura 15. Planteamiento para el cálculo de la rotación relativa (III). Fuente: elaboración propia	20
Figura 16. Curvas momento – rotación relativa para el modelo J16. Fuente: elaboración propia	21
Figura 17. Representación de energía cinética (ALLKE) y de energía interna de deformación (ALLIE) para el modelo J17. Fuente: elaboración propia	22
Figura 18. Tensiones de Von Mises en el modelo J17. Fuente: elaboración propia	23
Figura 19. Curvas fuerza – desplazamiento para el modelo J17. Fuente: elaboración propia	24
Figura 20. Curvas momento – rotación relativa para el modelo J16. Fuente: elaboración propia	24
Figura 21. Representación de energía cinética (ALLKE) y de energía interna de deformación (ALLIE) para el modelo J18. Fuente: elaboración propia	25

Figura 22. Tensiones de Von Mises en el modelo J18. Fuente: elaboración propia ...	26
Figura 23. Curvas fuerza – desplazamiento para el modelo J18. Fuente: elaboración propia	27
Figura 24. Curvas momento – rotación relativa para el modelo J18. Fuente: elaboración propia	28
Figura 25. Comparativa de las curvas fuerza – desplazamiento para los modelos J16, J17 y J18. Fuente: elaboración propia	29
Figura 26. Comparación de las curvas momento - rotación relativa para los modelos J16, J17 y J18. Sección S1. Fuente: elaboración propia	29
Figura 27. Comparación de las curvas momento - rotación relativa para los modelos J16, J17 y J18. Sección S2. Fuente: elaboración propia	30
Figura 28. Detalle del montaje de la unión con doble casquillo. Fuente: elaboración propia	31
Figura 29. Representación de energía cinética (ALLKE) y de energía interna de deformación (ALLIE) para el modelo J17 con doble casquillo. Fuente: elaboración propia	33
Figura 30. Tensiones de Von Mises en el modelo J17 con doble casquillo (I). Fuente: elaboración propia	34
Figura 31. Tensiones de Von Mises en el modelo J17 con doble casquillo (II). Fuente: elaboración propia	34
Figura 32. Curvas fuerza – desplazamiento para el modelo J17 con doble casquillo. Comparación con las curvas del modelo J17. Fuente: elaboración propia	35
Figura 33. Curvas momento – rotación relativa para el modelo J17 con doble casquillo. Comparación con las curvas del modelo J17. Fuente: elaboración propia ...	36
Figura 34. Comparación de las curvas fuerza - desplazamiento para los modelos J11 con casquillo simple y doble casquillo. Fuente: elaboración propia	37
Figura 35. Comparación entre desplazamientos del modelo J11. Fuente: elaboración propia	38

1 ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.

La estructura acero conformado representa un porcentaje cada vez mayor de la construcción en estructura metálica, por sus ventajas como son la relación resistencia-peso, la ligereza, la facilidad de fabricación y montaje, y la posibilidad de introducir innovación.

Por norma general para las correas de múltiples vanos es conveniente conseguir que se comporten como una viga continua con múltiples apoyos ya que de este modo se consigue soportar de manera más eficiente las cargas con un mismo perfil, comparándolas con un montaje de varias vigas biapoyadas. Para conseguir este comportamiento, es necesario conectar los perfiles en sus extremos. Existen dos métodos ampliamente extendidos con los que se consigue dicha conexión: Por solape o mediante unión de casquillo.

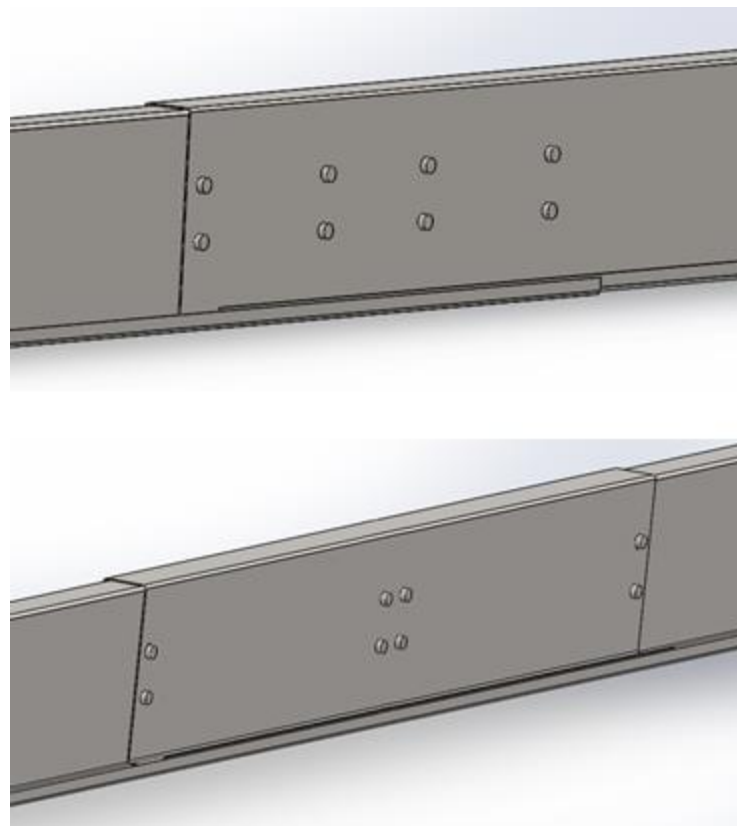


Figura 1. Comparación entre unión por solape (arriba) y unión de casquillo (abajo). Fuente: elaboración propia

Este trabajo tiene como objetivo el estudio numérico de la unión de casquillo para correas de múltiples vanos. Se trata de un tipo de unión conveniente para conectar perfiles de sección en Z, facilitando el proceso de montaje de las correas de múltiples vanos consiguiendo reducir tiempos y costes de ejecución. El estudio numérico considera un tipo de correa esbelta con diferentes conexiones de casquillo, variando la longitud de solape. El comportamiento de la unión se obtiene por la simulación del ensayo experimental de tres puntos de carga, que induce en la unión los esfuerzos reales que sufre una correa de la

Antecedentes y objetivos.

Pablo José Rama Ferradás

estructura secundaria en el cerramiento de las naves industriales bajo carga gravitatoria. Para ello se empleará el programa ABAQUS/CAE 6.14 con su módulo *Explicit*.

El principal objetivo del trabajo es capturar el comportamiento de las uniones estudiadas, es decir, su rigidez, su resistencia y el modo de fallo. Este estudio, aplicable en rango elástico que es la zona habitual de diseño, caracteriza el comportamiento semirrígido de las uniones de casquillo y se desarrolla en el marco de un proceso de mejora de estos sistemas estructurales, en un ámbito de creciente interés y aplicabilidad, que permita la automatización y optimización del diseño de las correas de múltiples vanos.

2 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO.

Con el fin de poder conseguir un modelo fiable con el que obtener los resultados que conciernen a este proyecto, debemos de validarlo con un ensayo reproducido previamente. Dicho ensayo intenta simular la ley de flectores que tendría lugar en la zona de mayor momento flector, la correspondiente al apoyo entre el primer y segundo vano de la viga (tal y como se muestra en la siguiente imagen, apoyos B y F).

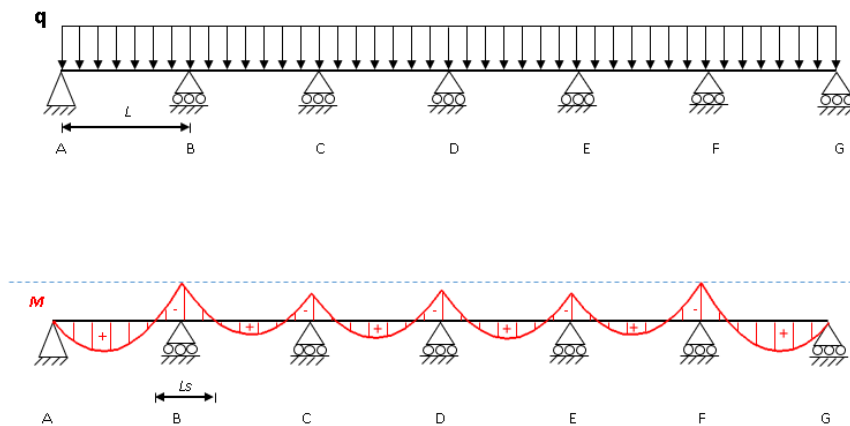


Figura 2. Diagrama de momentos flectores para una viga continua con múltiples apoyos, con carga distribuida. Fuente: elaboración propia

En este apoyo irá la unión de casquillo de nuestra correa. De este modo, el ensayo a replicar consiste en la unión de un sistema formado por cuatro perfiles, colocados dos a dos paralelamente y unidos mediante un casquillo. Este sistema se colocará en dos apoyos, de tal manera que la unión con casquillo quede situada en el punto medio. La longitud de dicho sistema será la misma que la distancia entre los dos puntos con momento flector nulo entre los cuales se sitúa el punto con momento flector máximo de la viga original. Se aplica entonces una carga puntual sobre la unión para así obtener una ley de flectores triangular que se aproxima a la original.

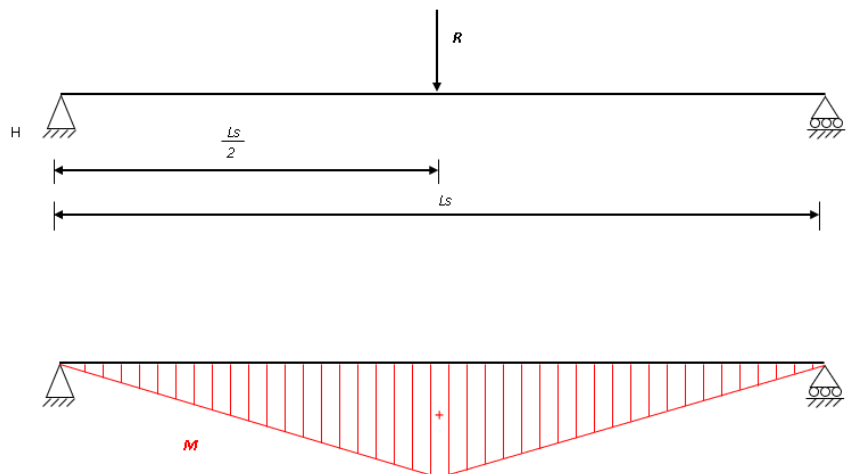


Figura 3. Diagrama de momentos flectores del ensayo. Fuente: elaboración propia

3 DISEÑO DEL SISTEMA.

1. Estudio de soluciones.

Para poder tener un modelo que se asemeje a la realidad, se replicará un ensayo para uniones empleando el método de elementos finitos con el programa ABAQUS y su módulo *explicit*. Este ensayo, ya descrito, se empleó anteriormente en el documento “*Numerical study of purlin joints with sleeve connections*”, en los cuales se plasman resultados de ensayos para diferentes perfiles y longitudes de solape del casquillo. Para poder tener un modelo aproximado a la realidad que nos permita estudiar el cometido de este TFG, se replicará uno de estos ensayos. Para ello se ha seleccionado el modelo “J11”, que une dos perfiles Z300 de 2,5 mm de espesor. De acuerdo al documento, la longitud de vano (L) de dicha correa es de 11 m, y se calculó que la distancia entre apoyos necesaria para el ensayo (Ls) es de 4,96 m.

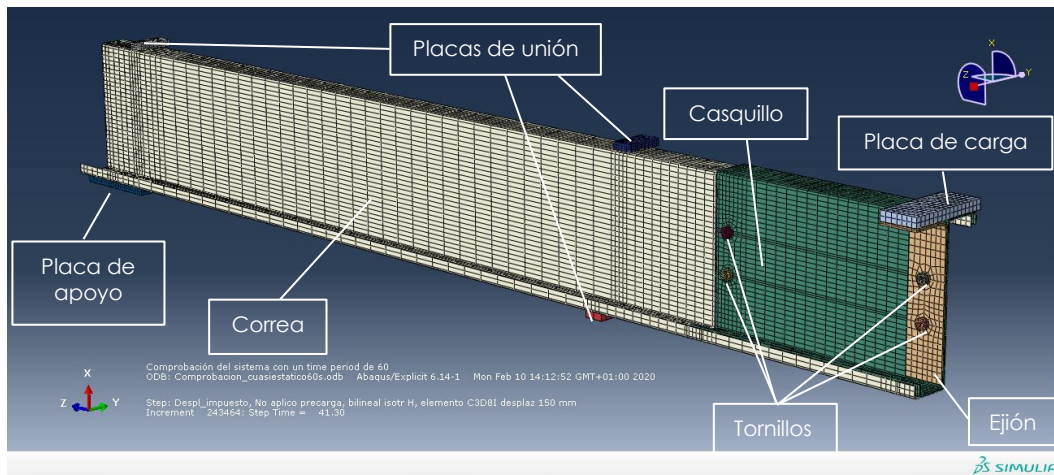


Figura 4. Modelado J11. Fuente: elaboración propia

Se puede observar que el modelo consta de una única viga (lo que supone una cuarta parte del montaje del ensayo). Sin embargo, gracias a la aplicación de condiciones de simetría (en las direcciones “Y” y “Z”) los resultados obtenidos se corresponden con los del estudio anteriormente mencionado. Así, en el modelo del ensayo se colocará un único apoyo.

Las piezas que conforman el modelo son:

- Correa. Elemento de estructura secundaria en el que se centra el proyecto.
- Casquillo. Elemento encargado de unir las dos correas longitudinalmente.
- Ejión. Fija la estructura secundaria a la principal.
- Placas de unión (“contornos”). Une una correa con la que tiene al lado.
- Placa de apoyo. Placa sobre la que se sitúa el apoyo del ensayo.
- Tornillos. Fijan el casquillo y el ejión a las correas.
- Placa de carga. Simula el apoyo en la estructura principal. Es donde se aplica la carga.

La sección que contiene la línea de tornillos que fijan ejión, casquillo y correa recibirá el nombre de sección S1. La sección que contiene al otro par de tornillos será, entonces, la sección S2.

Se han elegido dos materiales distintos para el modelo, uno para los tornillos y otro para el resto del modelo. Las características de estos materiales son:

- Acero para tornillos (calidad 10.9):
 - o Densidad: $7,85 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
 - o Módulo de Young: 210 GPa
 - o Coeficiente de Poisson: 0,3
 - o Límite elástico: 900 MPa

- Acero para chapas (acero S275):
 - o Densidad: $7,85 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
 - o Módulo de Young: 210 GPa
 - o Coeficiente de Poisson: 0,3
 - o Límite elástico: 275 MPa

Para la realización del estudio por el MEF, es necesario establecer una malla lo suficientemente fina como para captar los resultados de manera precisa. Aun así, no es conveniente que sea demasiado fina, pues los tiempos de cálculo aumentarían de manera innecesaria. Para este caso se ha seleccionado una malla C3D8I, es decir, de ortoedro de 8 nudos, lineal, y de modos incompatibles.

Para simular la carga se introduce un desplazamiento vertical sobre la pieza “placa” lo suficientemente grande como para provocar el fallo en el modelo, hasta superar el límite elástico del casquillo y de la correa. Además, este desplazamiento ha de aplicarse lo suficientemente despacio para así conseguir un comportamiento cuasiestático.

Una vez modelado el sistema en el programa, para considerar que el estudio sea válido, tenemos que comprobar que la carga se aplique de forma cuasiestática y que la representación gráfica fuerza – desplazamiento por viga que se obtenga se aproxime a la obtenida en el ensayo “*Numerical study of purlin joints with sleeve connections*” para J11.

Para comprobar que la carga ha sido aplicada de esta manera tendremos que comparar la energía interna de deformación con la energía cinética del sistema. El objetivo principal es conseguir minimizar esta energía cinética de tal manera que suponga un porcentaje pequeño en comparación con la energía interna de deformación.

Se han realizado varios cálculos, modificando los siguientes parámetros:

- *Amplitude*
- Tiempo de aplicación de la carga
- *Mass scaling*

Modificando el parámetro *Amplitude* cambiamos la manera de aplicar el desplazamiento al sistema. Primero se estableció un parámetro de *Amplitude* lineal (el desplazamiento aumenta linealmente conforme pasa el tiempo), pero se comprobó que cambiándolo por *smooth step* (donde el aumento del desplazamiento al comienzo de la aplicación de la carga es menos acusado que al final) se obtiene un mejor resultado.

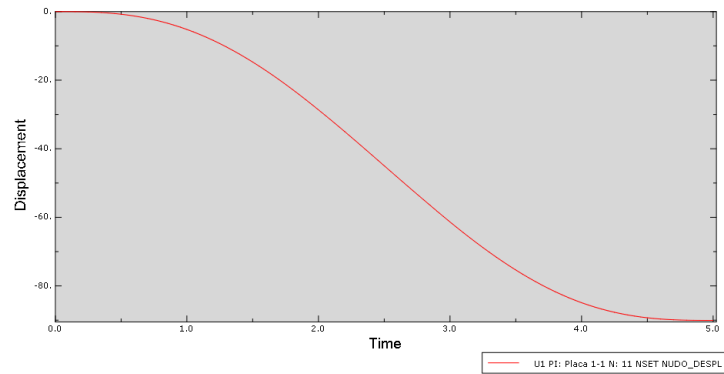


Figura 5. Ejemplo de *smooth step*. Fuente: elaboración propia

Modificando el tiempo de aplicación de la carga podemos hacer que dicha aplicación de la carga ocurra más rápido o más lento. Cuanto mayor es el tiempo, más tiende a ser cuasiestático. Sin embargo, aumentar este parámetro también implica un aumento en el tiempo de cálculo de la simulación.

El *Mass Scaling* es un concepto que se emplea para reducir los tiempos de cálculo que consiste en aumentar de manera uniforme la masa del sistema multiplicándola por un factor arbitrario. Es importante encontrar el valor adecuado de mass scaling, pues un valor demasiado grande puede provocar que el modelo deje de ser cuasiestático.

2. Cálculos.

Para poder calcular los resultados deseados, el programa *ABAQUS 6.14* dispone de un módulo que resulta imprescindible para este caso no lineal: el módulo *EXPLICIT*.

A diferencia de la biblioteca estándar (método *Implicit*), el método *Explicit* se emplea principalmente para casos no lineales, ahorrando recursos y optimizando los cálculos. Se tratan, pues, de dos métodos de integración distintos, los cuales resultan interesantes de cara a escoger para resolver el problema en función de las condiciones dadas.

La principal diferencia entre el método *Implicit* y el *Explicit* reside en el cálculo de la posición de equilibrio. En el primer caso, se calcula primero el equilibrio global por iteración, para luego calcular las variables locales para cada elemento de la malla. En el segundo, sin embargo, estas variables locales se calculan sin necesidad de calcular el equilibrio global. Para explicar mejor esta diferencia se puede demostrar calculando la solución de la Segunda Ley de Newton empleando cada uno de los métodos:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{f_{ext}\} \quad (1)$$

Donde $[M]$ es la matriz de masas del sistema, y $[K]$, la matriz de rigidez del mismo. $\{\ddot{x}\}$ es la aceleración nodal, $\{x\}$ el desplazamiento y $\{f_{ext}\}$ el vector de fuerzas externas.

En el cálculo *Implicit* se incrementa la solución del paso n al paso $n+1$ a lo largo del tiempo. Después se realiza una iteración donde el programa revisa si se cumple la igualdad en la ecuación 1: el equilibrio de las fuerzas internas (parte izquierda) es igual al de las fuerzas externas (parte derecha).

$$[M]\{\ddot{x}\}_{n+1} + [K]\{x\}_{n+1} = \{f_{ext}\}_{n+1} \quad (1a)$$

El tiempo de integración se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\frac{x_{n+1} - 2x_n + x_{n-1}}{\Delta t^2} = \frac{\ddot{x}_{n+1} + 2\ddot{x}_n + \ddot{x}_{n-1}}{4} \quad (2)$$

Que consiste en un método de diferencias finitas. Se trata de un método para aproximar derivadas el cual resulta conveniente para este tipo de cálculos. En este caso trataremos con una diferencia central de orden 2 basada en la aceleración media. Los desplazamientos resueltos quedan:

$$\left[\frac{4[M]}{\Delta t^2} + [K] \right] \{x\}_{n+1} = \{f_{ext}\}_{n+1} + \frac{4[M]}{\Delta t^2} (2\{x\}_n - \{x\}_{n-1}) + [M](2\{\ddot{x}\}_n + \{\ddot{x}\}_{n-1}) \quad (3)$$

En estas ecuaciones, Δt es el paso de tiempo. En la ecuación (2) está en forma escalar. Cabe mencionar dos detalles: por un lado, los desplazamientos en el paso $n+1$ son función de los desplazamientos y aceleraciones del paso anterior. Por otro, para resolver la ecuación (3) es necesario formar las matrices de masa y de rigidez antes de que los cálculos del equilibrio puedan comenzar. Esto requiere un coste computacional alto para recalcular los coeficientes de las matrices con un paso de tiempo distinto en el caso de no alcanzar el equilibrio. Sin embargo, si se alcanza el equilibrio no hay límite en el tamaño del paso de tiempo, salvo para cuando se consigue la solución deseada de los resultados en el dominio del tiempo.

En el cálculo *Explicit*, la ecuación (1) se representa de la siguiente forma:

$$[M]\{\ddot{x}\} = \{f_{ext}\} - [K]\{x\} = \{f_{ext}\} - \{f_{in}\} \quad (1b)$$

Donde el vector de fuerzas internas nodales se representa por $\{f_{in}\}$. Las aceleraciones se pueden calcular directamente de esta ecuación empleando una matriz de masas diagonal. De este modo no es necesario generar una matriz inversa de gran tamaño. Los desplazamientos y las velocidades pueden ser calculadas directamente usando un algoritmo de diferencias centrales, tal que:

$$\ddot{x}_{n+1} = \frac{(f_{ext} - f_{int})_{n+1}}{M} \quad (1c)$$

$$\overline{\Delta t} = \frac{\Delta t_{n+1} + \Delta t_n}{2}$$

$$\dot{u}_{n+\frac{1}{2}} = \dot{u}_{n-\frac{1}{2}} + \overline{\Delta t} \ddot{x}_{n+1} \quad (4)$$

$$u_{n+1} = u_n + \Delta t_{n+1} \cdot \dot{u}_{n+\frac{1}{2}}$$

Se puede emplear cualquier otro algoritmo, pero el de diferencias centrales es el más común. El método de diferencias centrales, junto al empleo de una matriz de masas diagonal son las características principales del procedimiento *Explicit*.

El término *Explicit* se emplea porque en las ecuaciones (1c) y (2) se refieren únicamente a valores de fuerza, desplazamiento, velocidades y aceleraciones al comienzo del nuevo paso de tiempo. Cabe mencionar que las velocidades se calculan en la mitad del paso de tiempo, pero suele ser trivial debido al tamaño de este. Sin embargo, el incremento del paso de tiempo es limitado. En el caso de ser muy grande tendrán lugar errores numéricos considerables. El hecho de que la ecuación (2) sea tan sencilla es clave para decantarse por el empleo de cálculos mediante el método *Explicit*. Como no se necesita calcular equilibrio, este método es muy útil a la hora de calcular problemas donde no es necesario conocer tal equilibrio.

A simple vista parece más eficiente el empleo del procedimiento *Explicit*, pero no siempre es así. Para aquellos casos lineales, de variaciones lentas de carga, sin componentes dinámicos o con otras condiciones favorables (aunque sean no lineales) puede ser más efectivo el empleo de condiciones *Implicit*. Sin embargo, si no se cumplen algunas de estas condiciones, decantarse por este método puede suponer un aumento innecesario del número de cálculos numéricos, aumentando el coste computacional y la efectividad a la hora de conseguir una solución.

Los problemas en los cuales es conveniente el empleo del procedimiento *Explicit* son:

- Problemas con cargas transitorias, de corta duración. Este tipo de cargas genera grandes fuerzas de inercia. Un ejemplo de este tipo de cargas es el del impacto de un misil.
- Problemas con grandes desplazamientos y contacto. El método *Explicit* es útil para resolver problemas donde diversos cuerpos pueden tener contactos intermitentes, pudiendo ser un buen ejemplo un problema con holguras en las que los sólidos no contactan inicialmente. Como no hay necesidad de estudiar las matrices globales de rigidez, o de establecer condiciones de equilibrio, los cambios en las condiciones de contorno y en las cargas intermitentes que provocan el contacto no suponen un problema para este método.
- Movimiento de sólido rígido. Si bien hay algún método *Implicit* adecuado para este tipo de problemas, se puede calcular mediante *Explicit*. Estos sólidos, los cuales no presentan deformaciones al ser cargados, permiten reducir su respuesta a simplemente traslación y rotación de su centro de masas. Para optimizar la eficiencia de cálculo es posible cambiar las propiedades del material, haciéndolo más rígido o deformable según convenga.
- Problemas en los que aparece pandeo y en los que se estudian la respuesta post – pandeo, en los cuales hay cambios bruscos en la rigidez global incluyendo, en algunos casos, situaciones de contacto.
- Problemas con respuestas del material que contienen plasticidad extrema en metales (tensiones cercanas al estado límite último), degradación de material y fractura. Este tipo de problemas generan grandes cambios en la rigidez en espacios cortos de tiempo, cosa que provocaría que un método *Implicit* tuviese que calcular continuamente la matriz de rigidez.

En los casos que se abordan en este proyecto nos encontramos varias de las condiciones mencionadas, como puede ser las situaciones de contacto intermitente y holguras.

3. Simulación.

Los primeros ensayos no resultaron satisfactorios. Véase el ejemplo de a continuación, donde se aplicó la carga con una *amplitude* lineal, un tiempo de aplicación de la carga de 15 segundos y un factor de *mass scaling* de 1000:

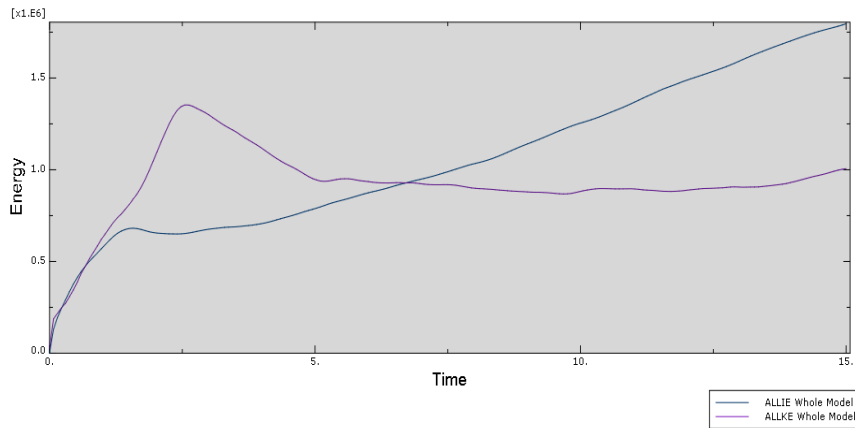


Figura 6. Representación de energía cinética (ALLKE) y de energía interna de deformación (ALLIE). No es cuasiestático. Fuente: elaboración propia

El tiempo en realizar esta simulación fue de aproximadamente 55 minutos, pero como se puede comprobar no se puede considerar un caso cuasiestático debido a que no se cumplen las premisas mencionadas anteriormente.

Así, tras varios ensayos prueba-error, se ha llegado a un modelo cuasiestático que se puede considerar válido. Se cambió el método de aplicación de la carga sustituyendo la *amplitude* lineal por una de tipo *smooth step*, una reducción del tiempo de aplicación de la carga de 15 s a 3 s y la eliminación del *mass scaling*, estableciendo un valor igual a 1.

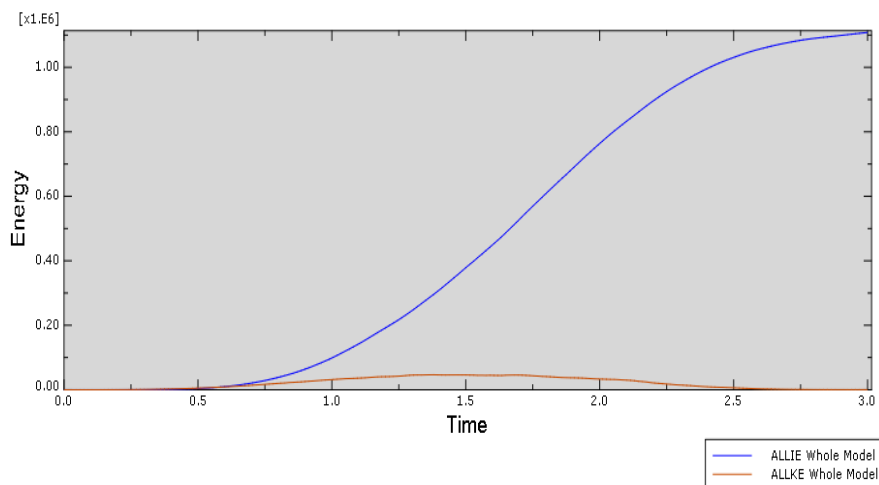


Figura 7. Representación de energía cinética (ALLKE) y de energía interna de deformación (ALLIE). Si es cuasiestático. Fuente: elaboración propia

Podemos observar que se cumple que el valor de la energía cinética represente un porcentaje muy pequeño si lo comparamos con la energía interna de deformación. El coste de esto es un tiempo de simulación sustancialmente mayor: aproximadamente 6 horas 40 minutos.

Ahora sólo falta calcular las gráficas fuerza-desplazamiento con el fin de compararla con el ensayo real. Tras hacer la representación gráfica, se obtuvo lo siguiente:

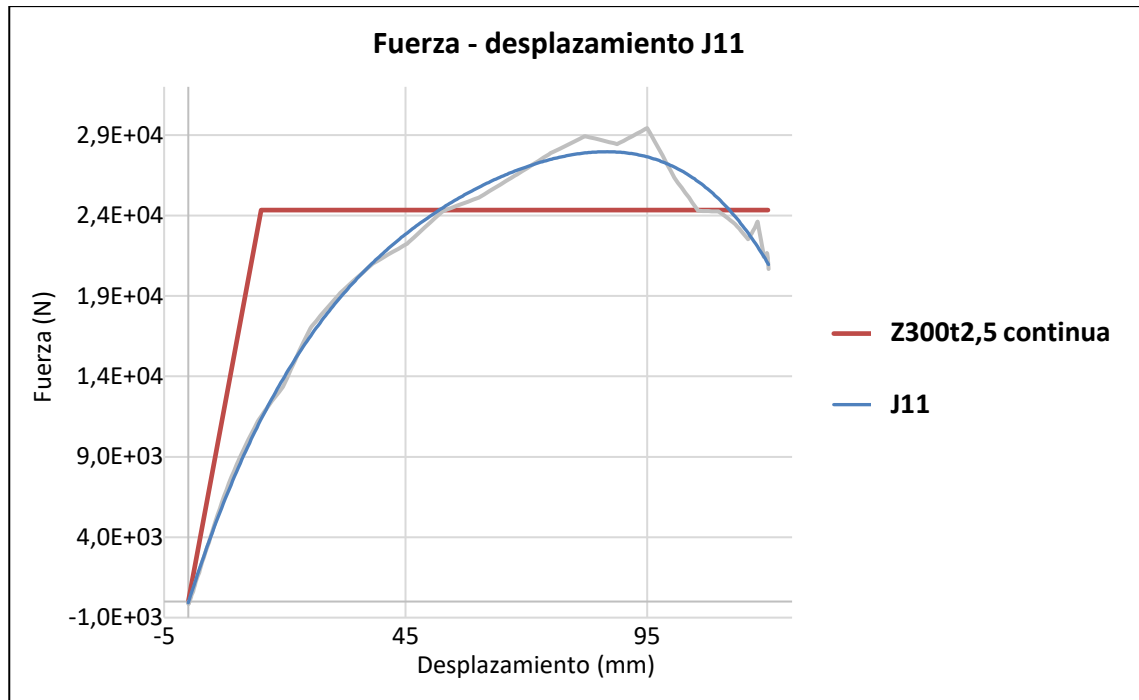


Figura 8. Representación fuerza-desplazamiento para el modelo final. Fuente: elaboración propia

Si se compara esta gráfica como la del ensayo, se comprueba que los resultados obtenidos son similares:

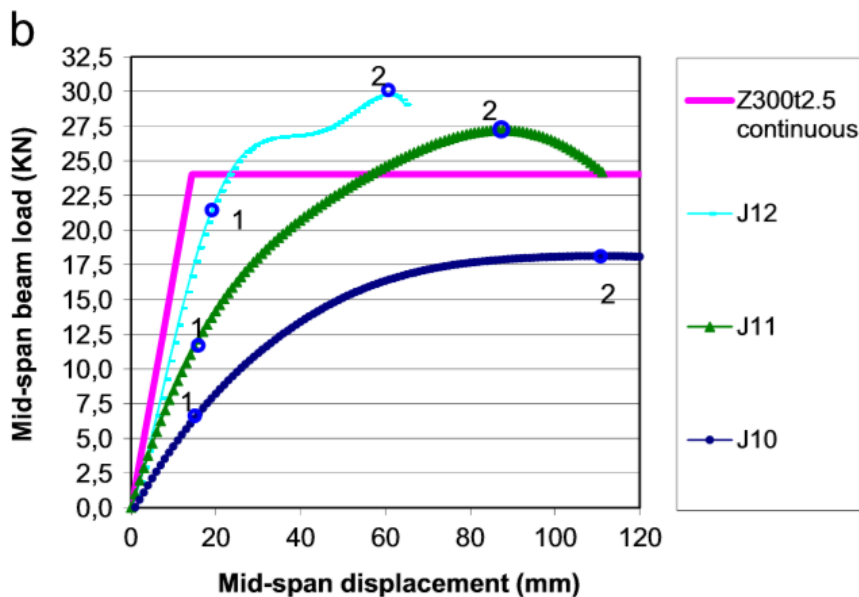


Figura 9. Resultados del ensayo real. Fuente: *Numerical study of purlin joints with sleeve connections*

Con esto damos por finalizada la validación del modelo dada la obtención de estos resultados, considerados satisfactorios, el cual aplicaremos para calcular los casos que planteamos en este trabajo. Procederemos entonces a la elaboración de sendos modelos equivalentes a los que incumbe este trabajo.

4 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO.

1. J16.

El primero de los tres modelos que propondremos para este trabajo será el J16. A diferencia de J11, tanto este modelo como los modelos J17 y J18 simulan una longitud de vano mayor. Esto repercute directamente en la longitud de simulación, ya que al aumentar la distancia entre apoyos aumenta también la distancia entre los puntos con momento flector nulo.

Las principales características de este modelo son el empleo de un perfil Z300t2.5 tanto para los perfiles a unir como para el casquillo. La longitud de solape ($2L_p$), que es el parámetro principal de diseño de la unión, es de 960 mm. La longitud de vano (L) es de 16000 mm y la longitud de simulación (L_s) es de 6500 mm. Se decidió no aplicar *mass scaling* y se empleó un tiempo de simulación de 3 segundos. Los materiales seleccionados son los mismos que en el modelo J11.

Una vez definidas las dimensiones de cada uno de los modelos, antes de analizar los resultados comprobaremos que se cumple la condición de cuasiestaticidad.

Para ello, tal y como vimos en la validación del modelo J11 compararemos las gráficas de energía interna de deformación y de energía cinética del sistema, de tal modo que la segunda sea claramente inferior a la primera.

Para el modelo J16 las curvas quedan:

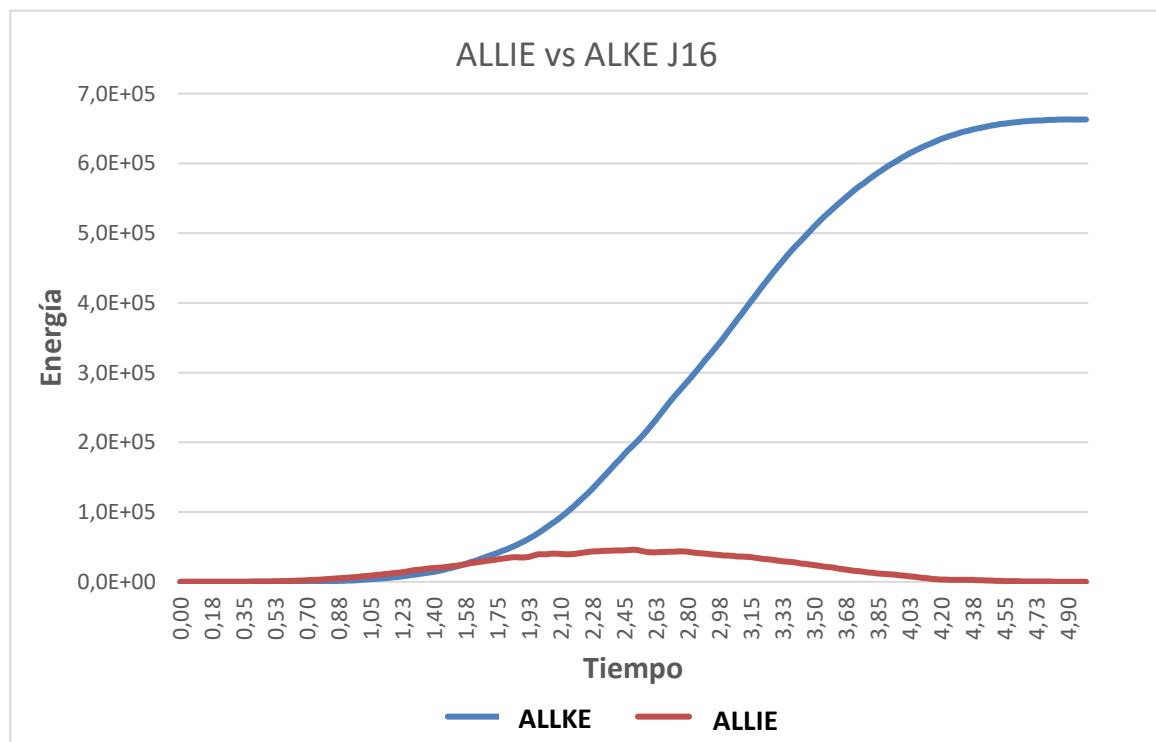


Figura 10. Representación de energía cinética (ALLKE) y de energía interna de deformación (ALLIE) para el modelo J16. Fuente: elaboración propia

Se observa que se cumple tal condición, por lo tanto, podemos afirmar que el modelo J16 es cuasiestático. Hecha esta comprobación procederemos a analizar los resultados obtenidos.

Primero analizaremos las tensiones de Von Mises. Además, indicaremos el camino de propagación de tensiones para estudiar así el comportamiento de la unión. Recordemos que el límite elástico f_y del material seleccionado para la elaboración de los perfiles es de 275 MPa. Se mostrará en el modelo las tensiones presentes en él mediante una escala de colores. Cuanto más cálido sea el color, mayor será la tensión. La superación de dicho límite elástico se representará por un color grisáceo en las texturas del modelo.

Para J16:

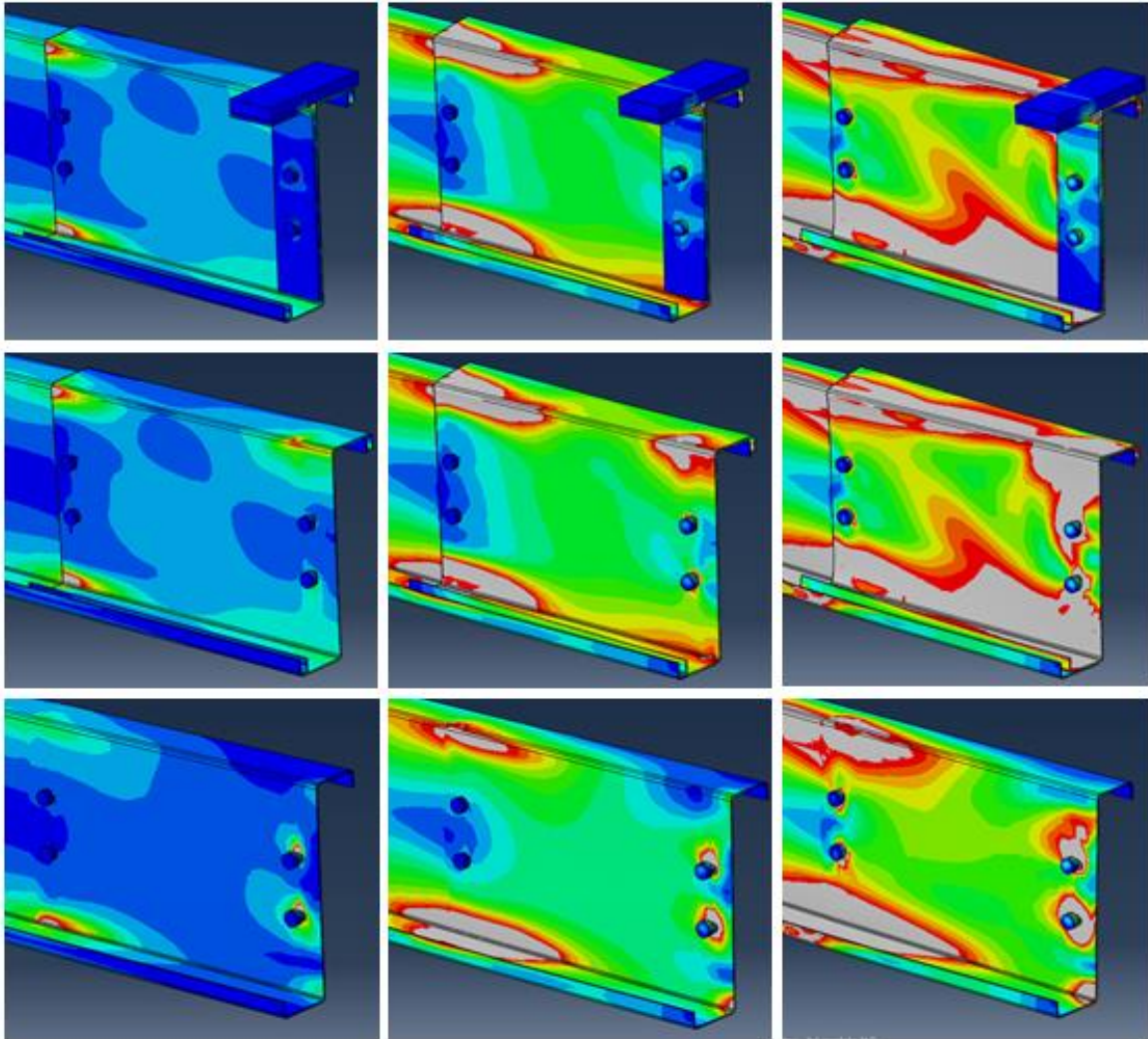


Figura 11. Tensiones de Von Mises en el modelo J16. Fuente: elaboración propia

La secuencia de imágenes anterior nos muestran las tensiones que aparecen en el modelo en tres instantes de tiempo distintos. Las secuencias se corresponden con los instantes $t = 0,8 s$, $t = 1,4 s$ y $t = 2,1 s$ respectivamente. Además, la primera fila muestra todos los componentes, la segunda fila representa el modelo sin la placa y el ejón, y para la última fila se ha retirado el casquillo.

Observando las imágenes se puede deducir que el camino de propagación de tensiones comienza con la aplicación de la carga sobre la placa, la cual se transmite a la correa y al ejón, el cual termina por plastificar haciendo que la carga la soporte únicamente

el casquillo. Este se deforma de tal manera que es el principal transmisor de tensiones a la correa, provocando que se debilite considerablemente la zona en la que se encuentra la sección S2 de la correa con la aparición de grandes plastificaciones. Sin embargo nos encontramos con que el casquillo llega a superar el límite elástico f_y en toda la sección S1 antes de que termine de plastificar la correa. Esto propicia la aparición de una primera rótula en esta sección: la unión falla.

Para demostrar numéricamente esta afirmación procederemos a calcular las curvas fuerza-desplazamiento.

Estas curvas representan el desplazamiento introducido en el ensayo con la fuerza ejercida durante el mismo, la cual se calcula a partir de la reacción en el extremo del modelo. Se procederá a comparar cada una de las curvas de los modelos entre si, además de compararlo con el valor teórico que se obtendría con un modelo continuo, con el perfil constante, donde no existiría ningún tipo de unión.

Para calcular la curva fuerza – desplazamiento del modelo continuo es necesario calcular el valor teórico de la fuerza. Partiremos de dos ecuaciones. La primera:

$$\sigma_{max} = \frac{M \cdot \frac{h}{2}}{I_z} \quad (5)$$

Es la ecuación de la tensión máxima admisible, donde σ_{max} es la tensión máxima admisible, M es el valor del momento flector, h es la altura de la sección y, por último, I_z es la inercia de la sección. La segunda:

$$M_{max} = \frac{R}{2} \cdot \frac{L_s}{2} \quad (6)$$

Es la ecuación del momento flector máximo en una viga biapoyada con carga puntual centrada. M_{max} es el valor del momento flector máximo, R es el valor de la carga aplicada que queremos calcular y L_s es la longitud de ensayo.

Entonces, para calcular R procedemos a, primero, despejar este valor en la ecuación (6):

$$R = \frac{4}{L_s} \cdot M_{max} \quad (7)$$

Por otro lado, despejamos el valor de M de la ecuación (5):

$$M = \frac{2 \cdot \sigma_{max} \cdot I_z}{h} \quad (8)$$

Por último, sustituimos el valor de M_{max} en la ecuación (7) por el valor de M despejado en la ecuación (8), quedando una expresión final:

$$R = \frac{8 \cdot \sigma_{max} \cdot I_z}{L_s \cdot h} \quad (9)$$

Una vez calculada la fuerza se procede a calcular el desplazamiento máximo. En este caso, al tratarse de una viga biapoyada con carga puntual centrada, la flecha máxima se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\delta = \frac{R \cdot Ls^3}{48 \cdot E \cdot I_z} \quad (10)$$

Donde, además de las variables ya mencionadas, aparece el módulo de Young E . Sustituimos los siguientes valores en las ecuaciones (9) y (10):

- $Ls = 6500 \text{ mm}$
- $h = 300 \text{ mm}$
- $I_z = 30,2 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$
- $\sigma_{max} = f_y = 275 \text{ MPa}$
- $E = 210 \text{ GPa}$

Quedando así el resultado:

$$R = 34 \text{ KN} \quad \delta = 30,7 \text{ mm}$$

Sin embargo, no hemos terminado todavía. Si bien el valor del desplazamiento se calcula con la fuerza R obtenida, el valor de R que debemos emplear para la comparación tiene que ser la mitad del obtenido. Esto es así porque, si recordamos el montaje del ensayo, se emplean dos perfiles en Z enfrentados uno con otro. Sin embargo, las reacciones que se obtienen en ABAQUS corresponden a únicamente uno de los dos perfiles. Por ello, tenemos que dividir esta reacción entre 2 con el fin de poder hacer la comparación, quedando el resultado final:

$$R = 17 \text{ KN} \quad \delta = 30,7 \text{ mm}$$

La curva fuerza – desplazamiento para el modelo J16 queda:

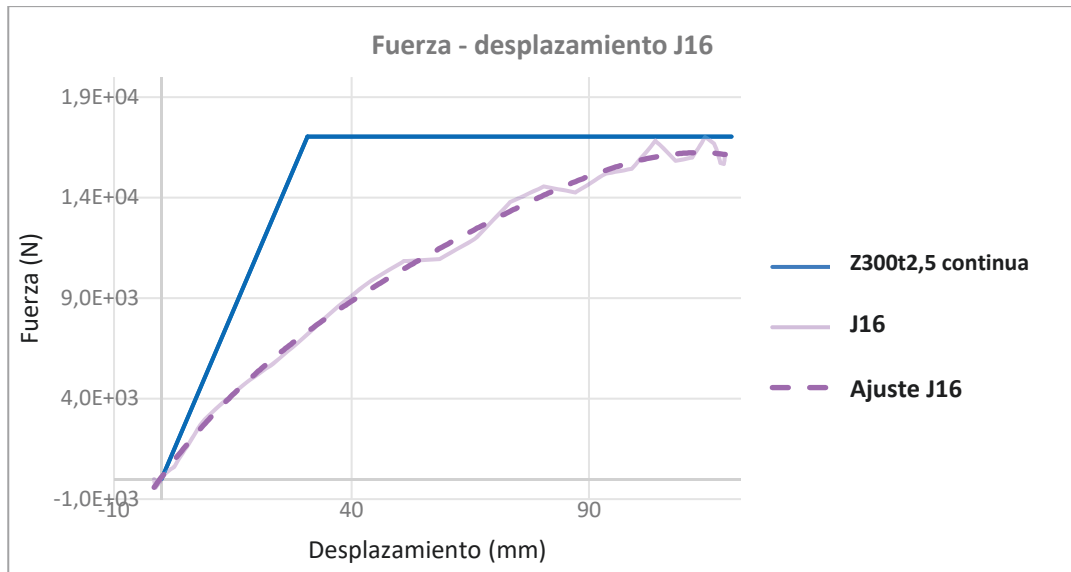


Figura 12. Curvas fuerza - desplazamiento para el modelo J16. Fuente: elaboración propia

Lo que más llama la atención es que la curva del modelo J16 no llega a alcanzar el valor del momento máximo para el modelo continuo. Esto está causado por la aparición de la rótula en el casquillo mencionada en el estudio del camino de tensiones, lo cual nos lleva a la conclusión de que el casquillo está tan solicitado que falla antes de lo que debería.

Otro cálculo interesante a la hora de observar el comportamiento del modelo son las curvas momento – rotación relativa. La formación de una rótula debida a la plastificación de la sección en la línea de tornillos S1 hace conveniente el estudiar la rotación relativa entre la correa y el casquillo. Con la obtención de estas curvas es posible evaluar la rigidez de la unión. Para ello, calcularemos las curvas tanto para la sección S1 como para la sección S2. Este cálculo se podría emplear para la construcción de un modelo con muelles rotacionales, si se diese el caso.

El proceso para obtener estas curvas requiere operar con varios resultados calculados mediante ABAQUS. Comenzamos primero calculando los momentos que aparecen en cada una de las secciones a estudiar para luego calcular las rotaciones relativas.

Para calcular el momento M en cada una de las secciones se multiplica la fuerza de reacción R por la distancia de la sección al apoyo r .

$$M = r \cdot R \quad (11)$$

El cálculo de las rotaciones relativas se calcula a partir de los desplazamientos en la dirección Z. para ello, se seleccionarán dos puntos contenidos en la sección a estudiar. A mayores estos puntos tienen que estar en el plano donde están en contacto la correa y el casquillo. Primero se calculará la rotación en cada una de las dos piezas con respecto a la horizontal para después restarlas entre sí. Una vez hecho esto, la rotación relativa ya estaría calculada.

El procedimiento para el cálculo de la rotación de cada una de las piezas es intuitivo. Antes de todo, al escoger a conveniencia los dos puntos mencionados antes, la distancia entre ellos es conocida. Una vez sabido esto, procederemos a la elaboración de dicho cálculo.

1. Partimos de una posición inicial horizontal y planteamos, para la deducción, una posición final arbitraria.

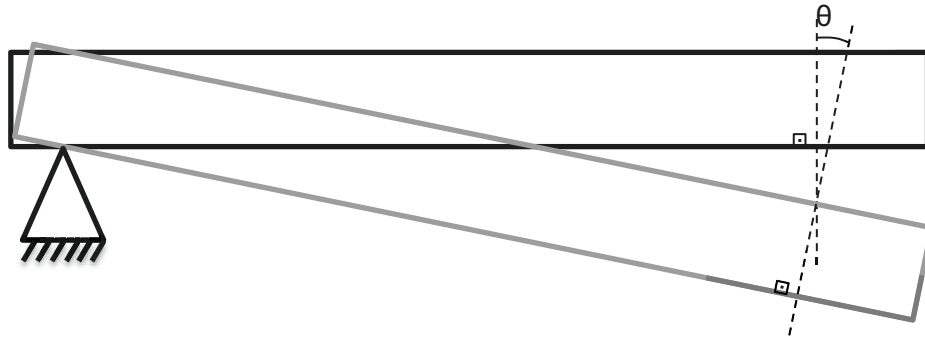


Figura 13. Planteamiento para el cálculo de la rotación relativa (I). Fuente: elaboración propia

2. Para una sección dada, la rotación existente será denominada, tal y como se muestra en la ilustración anterior, θ . Procedemos a seleccionar los dos puntos sobre la sección separados una distancia d . El punto superior será A, mientras que al inferior lo llamaremos B. Los mismos puntos, pero en la posición final se denotarán por A' y B', respectivamente.

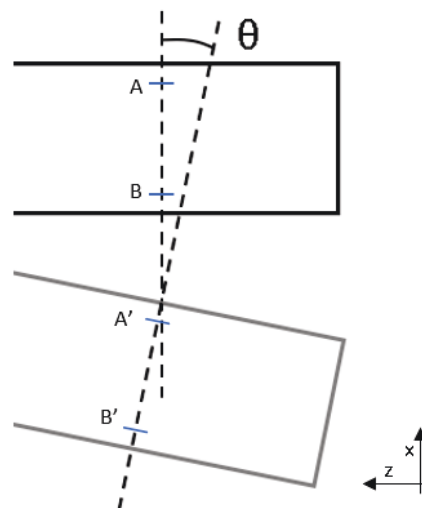


Figura 14. Planteamiento para el cálculo de la rotación relativa (II). Fuente: elaboración propia

En la figura anterior es apreciable la existencia del desplazamiento en la dirección del eje z mencionado anteriormente. Esto nos permite plantear un sencillo esquema con forma de trapecio, del cual podemos deducir la rotación:

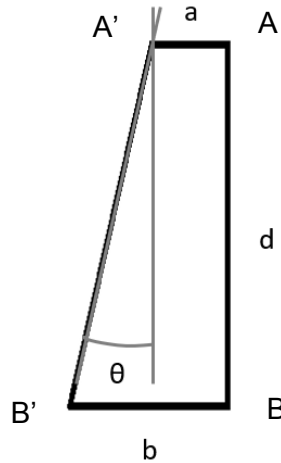


Figura 15. Planteamiento para el cálculo de la rotación relativa (III). Fuente: elaboración propia

En esta figura, a representa el desplazamiento del punto A y b el desplazamiento del punto B.

3. Se procede a despejar la rotación. La ecuación por la cual se obtiene el ángulo sería:

$$\tan(\theta) = \frac{b-a}{d} \quad (12)$$

Como estamos tratando con ángulos muy pequeños, podemos aproximar $\tan(\theta) \approx \theta$, quedando la expresión tal que:

$$\theta \approx \frac{b-a}{d} \quad (13)$$

Con esto ya somos capaces de calcular las curvas momento – rotación relativa. Lo único que faltaría sería calcular el momento y la rotación del modelo continuo, que queda de la siguiente manera:

$$M = \frac{R}{2} \cdot r \quad (14)$$

R es el valor de la reacción calculada ($R = 17 \text{ KN}$) y r es la longitud entre la sección y el apoyo ($r = 3210 \text{ mm}$ para S1 y $r = 2770 \text{ mm}$ para S2). Entonces, para el modelo J16 los momentos para cada sección quedan:

$$M_{S1} = 2,73 \cdot 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}$$
$$M_{S2} = 2,36 \cdot 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Con todo esto ya es posible la elaboración de las curvas momento – rotación relativa para cada uno de los modelos. Las curvas resultantes para el modelo J16 quedan:

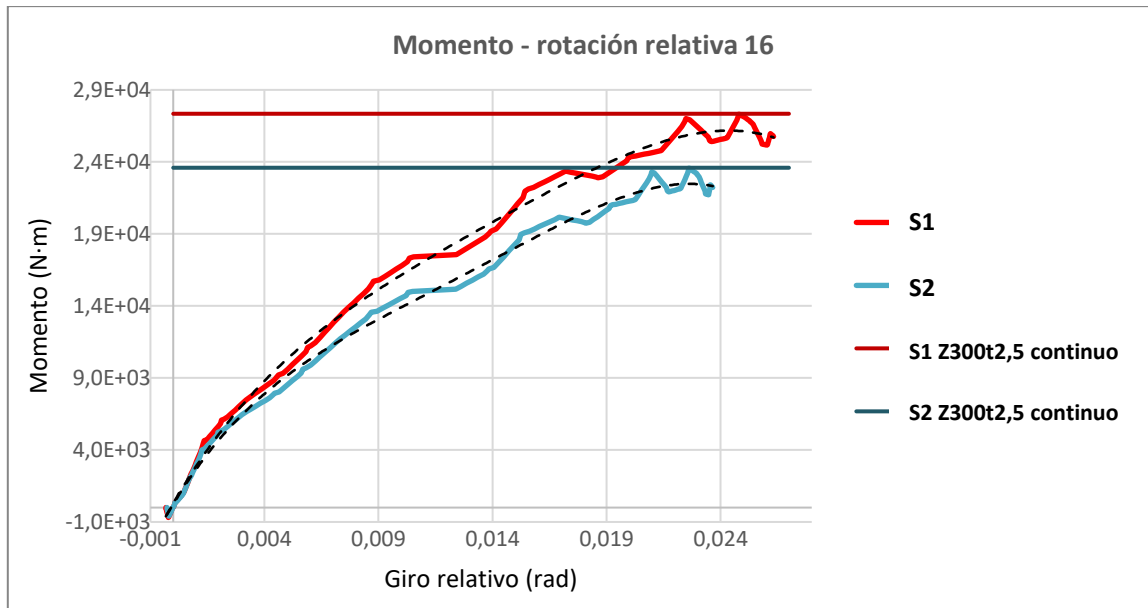


Figura 16. Curvas momento - rotación relativa para el modelo J16. Fuente: elaboración propia

Se observa que en la sección S1, que es por donde falla el modelo, no se llega a alcanzar el valor del momento calculado para el modelo continuo. Esto es un dato importante, pues la unión no resiste el momento esperado para el caso teórico. De los tres modelos, esta será la unión menos rígida. La explicación a esto es la dada anteriormente para las curvas fuerza – desplazamiento: este comportamiento es causado por la plastificación del casquillo, lugar donde se forma una rótula. Cabe mencionar que la curva de la sección S2 es similar que la de S1 salvo por el hecho que, debido a su menor distancia con el apoyo, los valores del momento son menores.

Con esto, damos por finalizados los cálculos para el modelo J16. El procedimiento de cálculo para los modelos J17 y J18 son el mismo, salvo por los valores del momento del modelo continuo para la sección S2. Por ello no se profundizará en los cálculos como en este caso y se mostrarán directamente los resultados.

2. J17.

El modelo J17 es similar al J16, con la única diferencia de que cambia la longitud de solape del casquillo. Al igual que en el anterior, en este caso se seleccionó un perfil Z300t2.5 para correas y casquillo. La longitud de solape ($2L_p$) es de 1360 mm , la longitud de vano (L) es de 16000 mm y la longitud de simulación (L_s) es de 6500 mm . El tiempo de simulación es de 3 segundos, y en este caso tampoco se recurrió al empleo de *mass scaling*. Los materiales seleccionados son los mismos que en el modelo J11.

Procedamos entonces a comprobar si el modelo es cuasiestático. Las curvas de energía interna (ALLIE) y energía cinética (ALLKE) quedan:

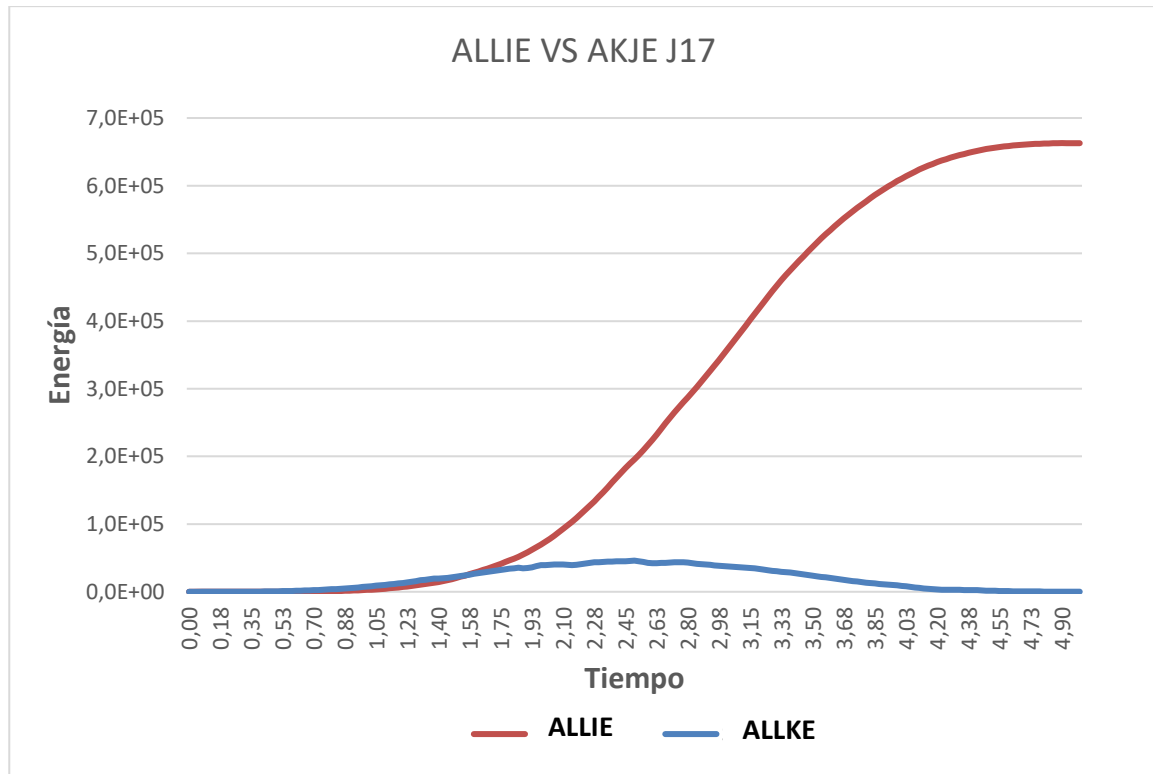


Figura 17. Representación de energía cinética (ALLKE) y de energía interna de deformación (ALLIE) para el modelo J17. Fuente: elaboración propia

Al igual que en el caso anterior se observa que la energía cinética representa un porcentaje pequeño de la energía interna. De este modo, entonces, se puede decir que el modelo es cuasiestático.

Del mismo modo que con el modelo anterior, procedamos ahora al estudio del camino de tensiones. Siguiendo el mismo criterio y recordando que el límite elástico f_y del material es de 275 MPa se pueden apreciar las tensiones mostradas en la siguiente figura:

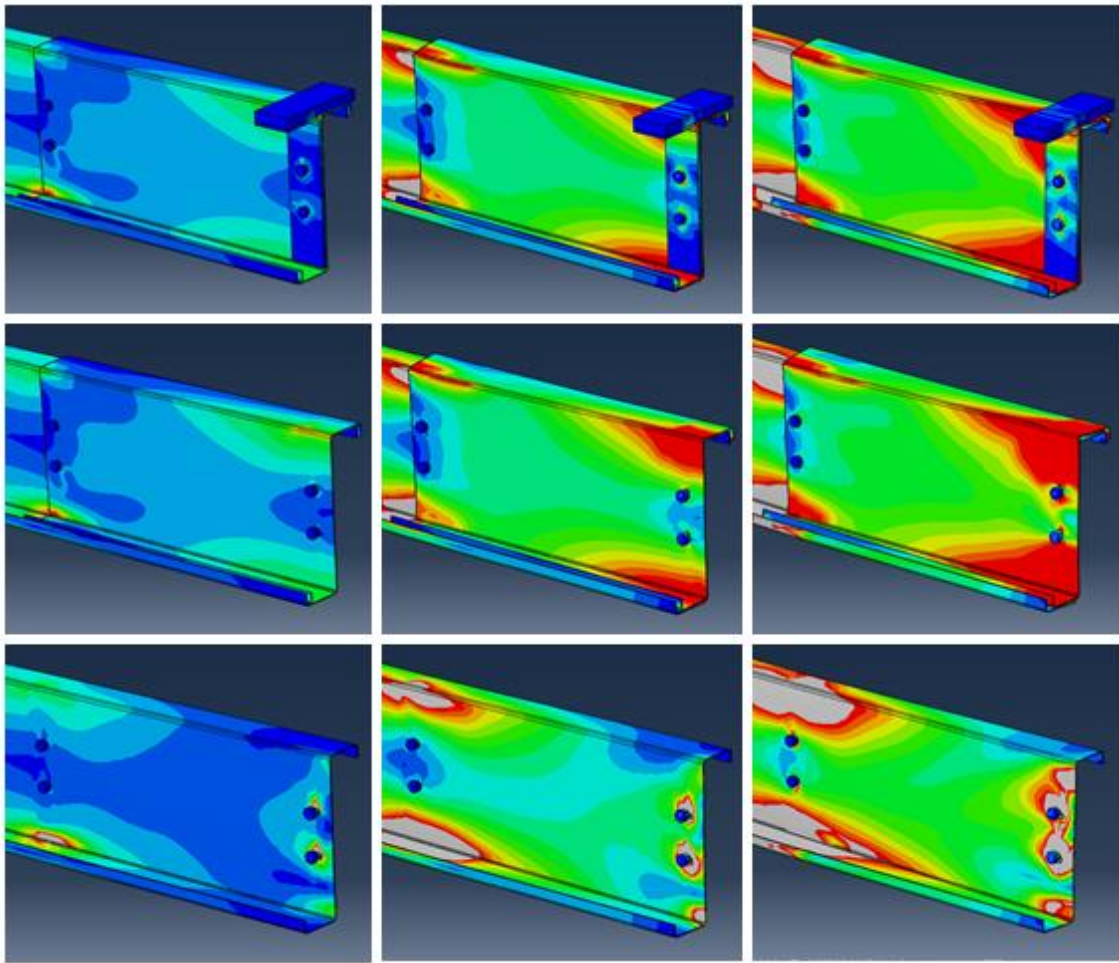


Figura 18. Tensiones de Von Mises en el modelo J17. Fuente: elaboración propia

La secuencia de imágenes anterior responde al mismo orden que la mostrada en el modelo J16. Las tensiones que aparecen en el modelo se corresponden con tres instantes distintos: $t = 0,9 s$, $t = 1,5 s$ y $t = 2,2 s$ respectivamente. Además, la primera fila muestra todos los elementos del montaje, la segunda fila representa el modelo sin la placa y el ejón, y para la última fila se ha retirado el casquillo.

El camino de propagación de tensiones es el mismo que en el caso J16. Empieza desde la placa al ejón (el cual termina plastificando de manera prematura, como en el modelo anterior) y al casquillo. Pese a no superarse en él el límite elástico, la deformación del casquillo propicia la transmisión de carga a la correa por contacto entre las dos piezas. En este caso el casquillo no plastifica por bastante poco, pero las tensiones son lo suficientemente grandes como para hacer inservible el casquillo. La tendencia es la del modelo J16, donde la sección S1 está muy solicitada. De todos modos, es evidente la tendencia de la correa a plastificar en la sección S2, de tal modo que se acabaría formando una rótula en la zona próxima a tal sección.

Tras esta observación resulta interesante calcular las curvas fuerza – desplazamiento. El cálculo para los resultados de ABAQUS es el mismo que el realizado en J16. Además, el modelo continuo para estas curvas es el mismo. Los resultados quedan de la siguiente forma:

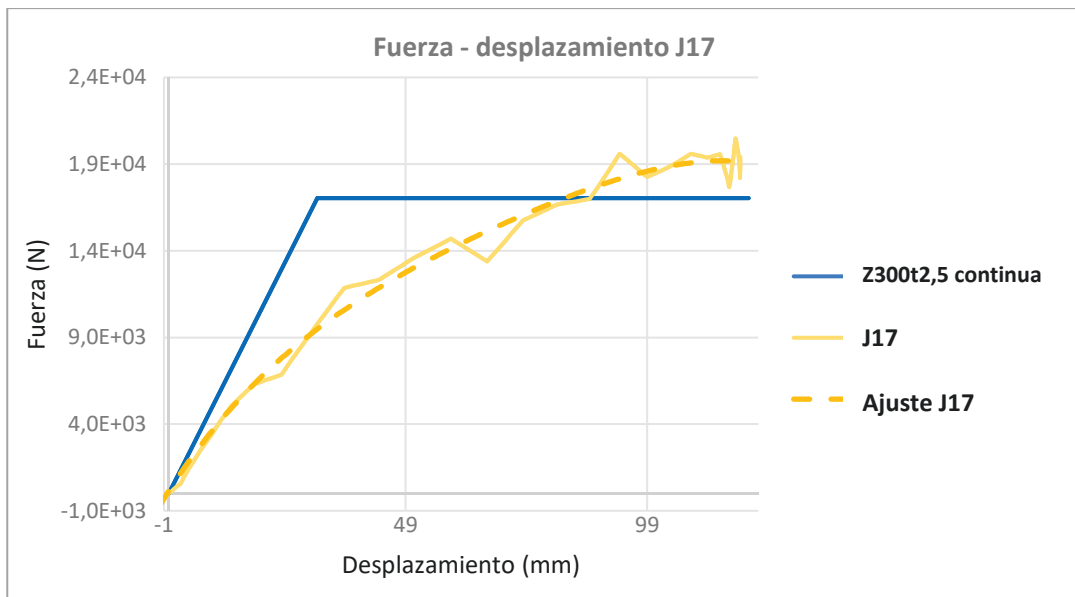


Figura 19. Curvas fuerza - desplazamiento para el modelo J17. Fuente: elaboración propia

Para el modelo J17 se nota una mejoría con respecto al anterior. Si comparamos la curva obtenida con las del modelo continuo podemos observar que a partir de un valor del desplazamiento próximo a 80 mm , el modelo J17 resiste más que el modelo continuo. Esto es debido a que al aumentar la longitud del casquillo se ha conseguido un aumento de la sección en parte del perfil, provocando una mejora en la capacidad resistiva. El hecho de que el casquillo no haya llegado a plastificar ha ayudado también a conseguir estos resultados.

Tras calcular las curvas fuerza – desplazamiento procedemos al cálculo de las curvas momento – rotación relativa para evaluar la rigidez de la unión. La manera de calcular estas curvas es la explicada en el modelo J16, quedando la siguiente gráfica:

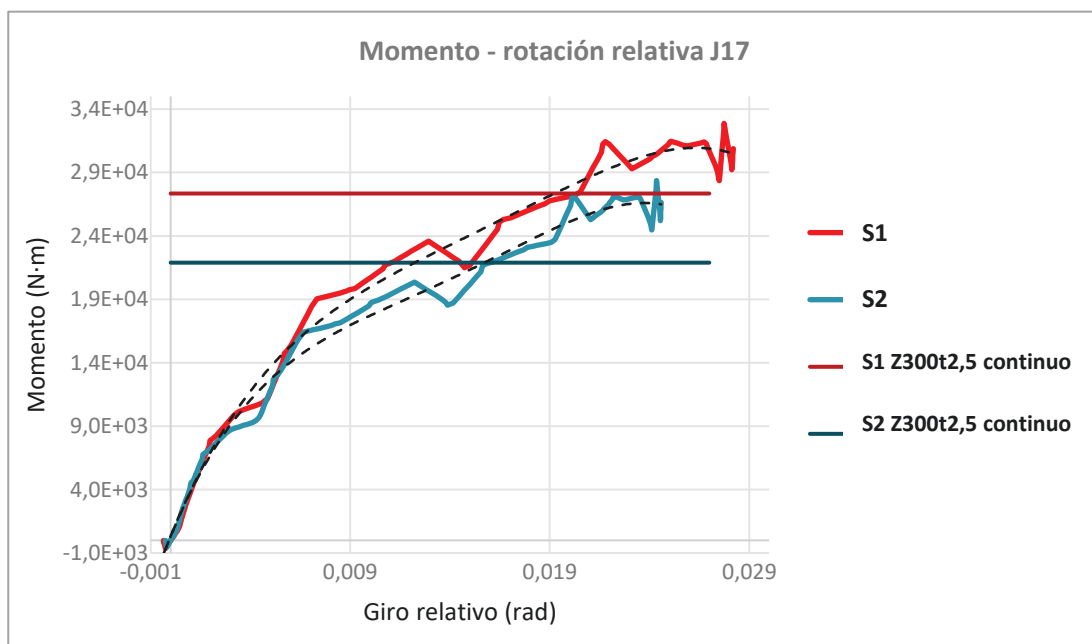


Figura 20. Curvas momento - rotación relativa para el modelo J17. Fuente: elaboración propia

Los valores de momento para el modelo continuo en cada una de las secciones son:

$$M_{S1} = 2,73 \cdot 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{S2} = 2,19 \cdot 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Para este caso se observa en S1 que, comparando el modelo J17 con el modelo continuo, a partir de los $0,02 \text{ rad}$ aproximadamente la unión soporta un mayor momento. Recordemos que esto no sucedía en J16, por lo que se observa un aumento de la rigidez con el aumento de la longitud de solape $2Lp$. Como es lógico, la rotación de la sección S2 sigue a la de S1 pero, dada su menor distancia con el apoyo, con un valor del momento menor.

Tras terminar de exponer los cálculos del modelo J17, procedemos a comentar el modelo J18.

3. J18.

Viendo la tendencia de mejora que se consiguió con el modelo J17 con respecto al modelo J16, para este modelo J18 se espera mejorar más si cabe los resultados.

Del mismo modo que en los modelos anteriores, se seleccionó para el modelo un perfil Z300t2.5 tanto para las correas como para el casquillo. La longitud de solape ($2Lp$) es de 1760 mm, la longitud de vano (L) es de 16000 mm y la longitud de simulación (Ls) es de 6500 mm. El tiempo de simulación es, también, de 3 segundos, y en este caso tampoco se implementó un valor de *mass scaling*. Los materiales seleccionados son los mismos que en el modelo J11.

Al igual que para los casos anteriores, es importante comprobar si el modelo es cuasiestático. Volvemos a recurrir a la comparación entre las curvas de energía interna de deformación (ALLIE) y de energía cinética (ALLKE):

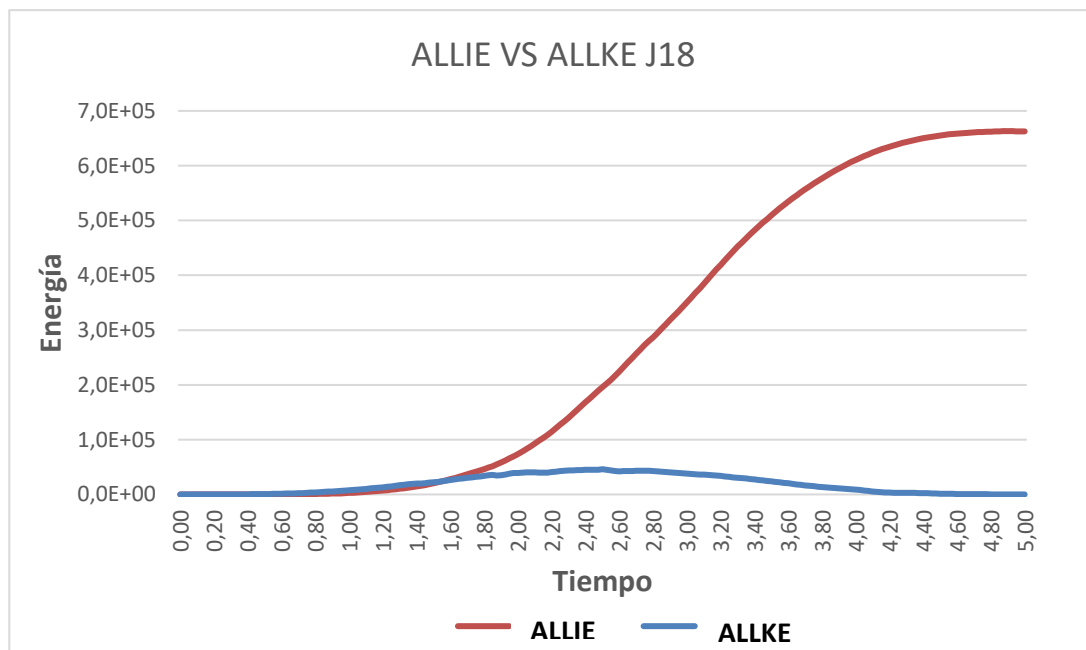


Figura 21. Representación de energía cinética (ALLKE) y de energía interna de deformación (ALLIE) para el modelo J18. Fuente: elaboración propia

Se cumple que, tal y como se da en los modelos J16 y J17, la energía cinética es claramente inferior a la energía interna del sistema, quedando así demostrado que el modelo es cuasiestático.

Procedamos entonces al estudio del camino de tensiones. Recordando que el límite elástico f_y es de 275 MPa, las tensiones que sufre el modelo J18 quedan representadas de la siguiente manera:

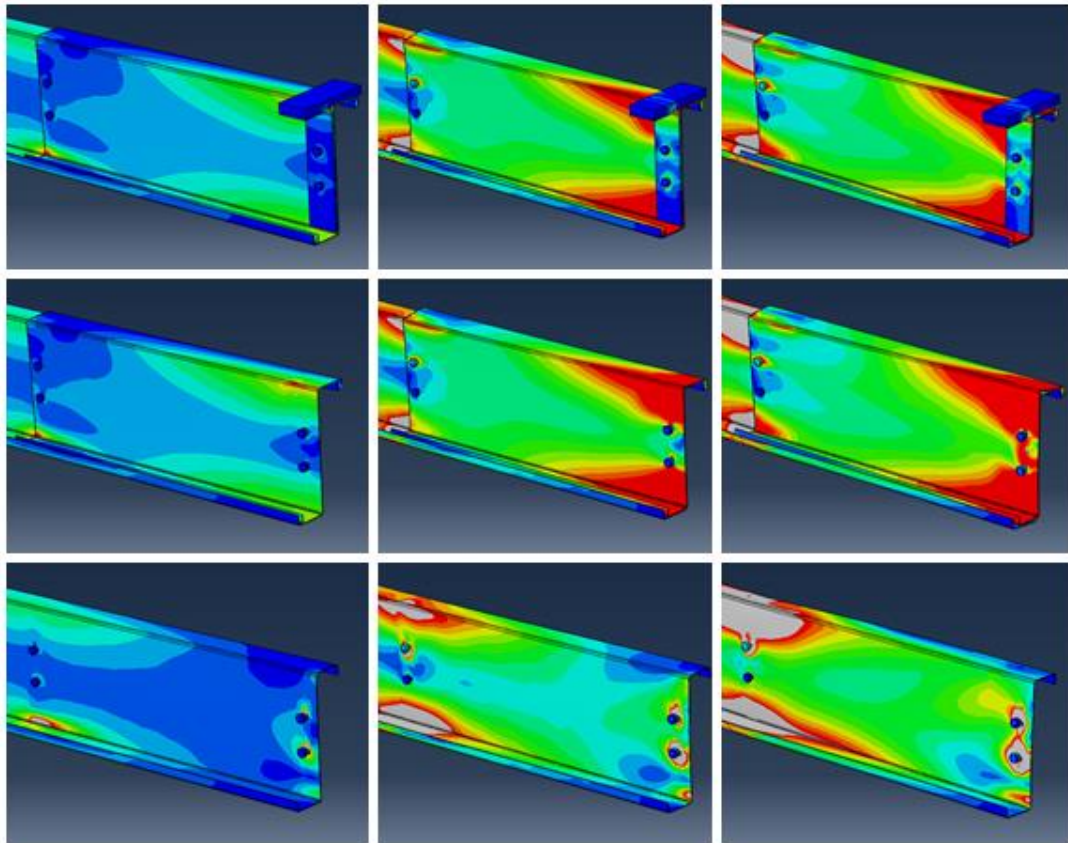


Figura 22. Tensiones de Von Mises en el modelo J18. Fuente: elaboración propia

La secuencia de imágenes anterior sigue el mismo orden que las expuestas para los modelos J16 y J17. Se nos muestran las tensiones que aparecen en el modelo en tres instantes distintos: $t = 0,9 s$, $t = 1,5 s$ y $t = 2,2 s$ respectivamente. Además, la primera fila muestra todos los elementos del montaje, la segunda fila representa el modelo sin la placa y el ejón, y para la última fila se ha retirado el casquillo.

En el caso de J18 no encontramos diferencia con los anteriores. La carga se transmite de la placa al ejón (que plastifica prematuramente) y al casquillo, el cual debido al contacto causado por la deformación del mismo transmite la carga a la correa. El casquillo está muy solicitado en S1, pero no llega a plastificar. Hay una tendencia a formar una rótula en S2 al comenzar a plastificar la correa.

Una vez mostrado el camino de tensiones procederemos al cálculo de las curvas fuerza – desplazamiento. El modelo continuo es el mismo que el de los casos anteriores, y el método para calcular las curvas del modelo es el mismo que para los modelos J16 y J17. Las curvas quedan:

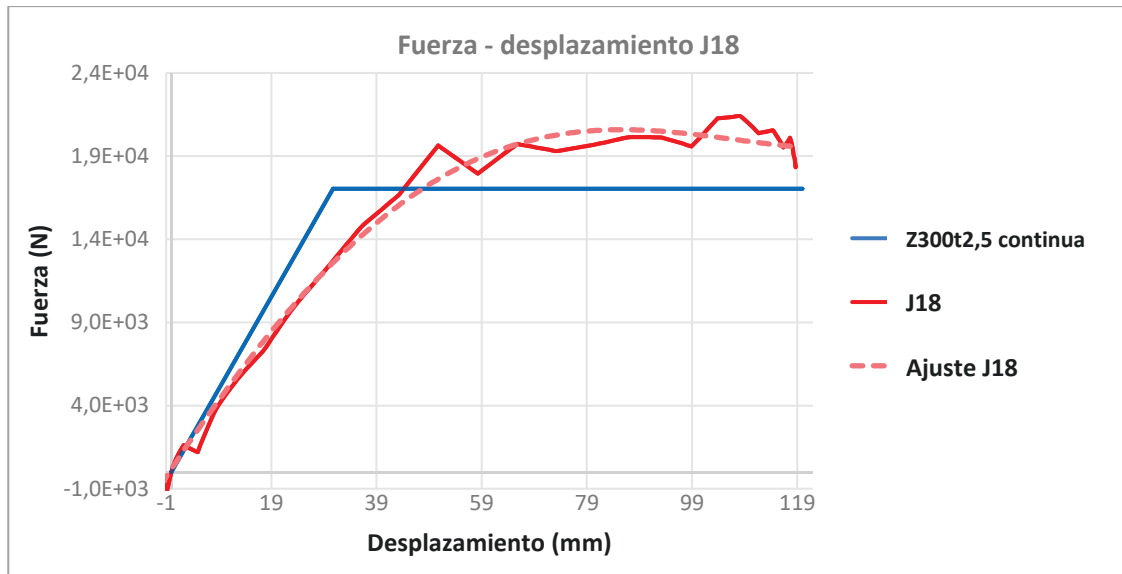


Figura 23. Curvas fuerza - desplazamiento para el modelo J18. Fuente: elaboración propia

Para este caso, la curva del modelo J18 tiende a ajustarse más a la del modelo continuo cuando este todavía no ha llegado al máximo. A mayores se observa que para un mismo desplazamiento a partir de entre 45 mm y 50 mm se requiere una fuerza mayor para el modelo J18. La respuesta a esto viene dada por la longitud del casquillo en este modelo, ya que aumenta la sección del conjunto en un tramo de correa grande. El momento en el que el modelo J18 tiende a decrecer es cuando se formó la rótula en la correa. El razonamiento es el mismo que el expuesto para el modelo J17.

Después de calcular las curvas fuerza – desplazamiento procederemos al cálculo de las curvas momento – rotación relativa. Cabe esperar un modelo rígido comparado con los anteriores. Los valores del momento para las secciones S1 y S2 del momento continuo quedan:

$$M_{S1} = 2,73 \cdot 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{S2} = 2,02 \cdot 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}$$

El cálculo de estas curvas para el modelo propuesto J18 se rige por los mismos cálculos empleados en el modelo J16. Las curvas, entonces, quedan:

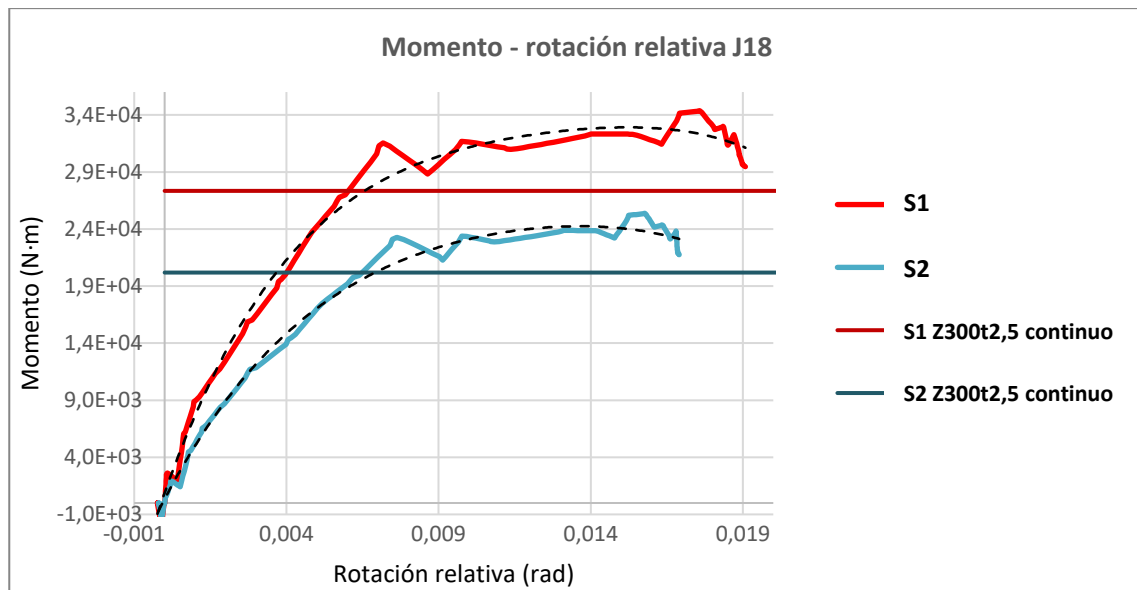


Figura 24. Curvas momento - rotación relativa para el modelo J18. Fuente: elaboración propia

Se comprueba que la unión es más rígida. Es más, a partir de una rotación relativa de $0,007 \text{ rad}$, la rotación que aparece en la sección S1 para el modelo J18 requiere de un momento mayor que momento presente en el modelo continuo. La rotación de S2 tiende a seguir a la de S1, pero con valores del momento menores. Se observa con respecto a los otros modelos que la diferencia entre las curvas de las secciones es mayor, pero se trata de una diferencia lógica. El aumento de la longitud de casquillo provoca que la distancia entre las secciones sea mayor y, por ende, la diferencia entre el valor del momento para una misma fuerza se incrementa.

Una vez se expusieron los modelos J16, J17 y J18 es conveniente hacer una comparación entre ellos.

4. Comparación entre los tres modelos

Resulta conveniente hacer una comparación entre los modelos J16, J17 y J18 para ver cómo influye el aumento de la longitud de casquillo. Si nos fijamos en el estudio del camino de tensiones, el camino es el mismo. Aun así en el modelo J16 (figura 10) se ve cómo se forma una rótula en S1 provocando que no se pueda aprovechar al máximo las propiedades resistivas del perfil que conforma la correa. Sin embargo, observando los modelos J17 (figura 17) y J18 (Figura 21) se observa que la plastificación sucede en la correa, formándose la rótula en la zona próxima a S2. Aun así es visible que el casquillo alcanza tensiones muy próximas a la máxima admisible, mermando así sus propiedades resistivas.

Por otro lado, compararemos las curvas fuerza – desplazamiento de los tres modelos. Si las superponemos se observa lo siguiente:

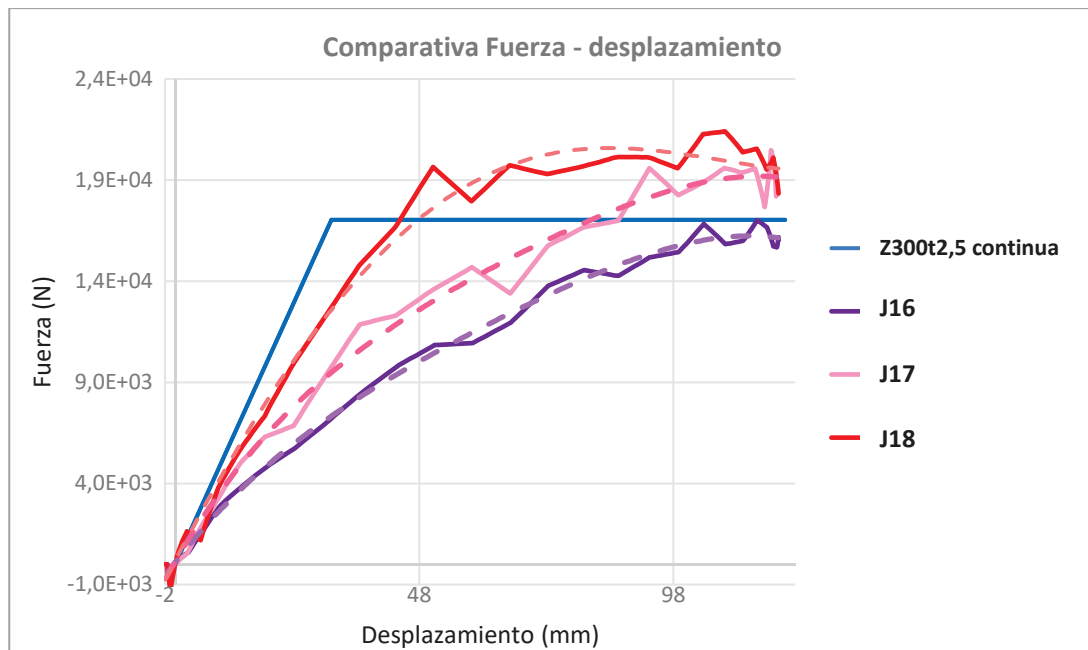


Figura 25. Comparativa de las curvas fuerza - d- desplazamiento para los modelos J16, J17 y J18. Fuente: elaboración propia

A mayor longitud de solape $2Lp$, más fuerza es necesaria aplicar al conjunto para producir un mismo desplazamiento. De este modo podemos concluir que el modelo J18 es la unión que mayores fuerzas resiste. La deducción sacada a partir de los datos del porqué de esta afirmación ya se adelantó anteriormente: al aumentar la longitud del casquillo al final provoca un aumento de sección en partes de la correa, mejorando sus propiedades resistivas.

Por otro lado, analizando las curvas momento – rotación relativa para cada uno de los casos se observa que la rigidez aumenta con el aumento de la longitud de solape. A continuación se muestran agrupadas las curvas para cada sección:

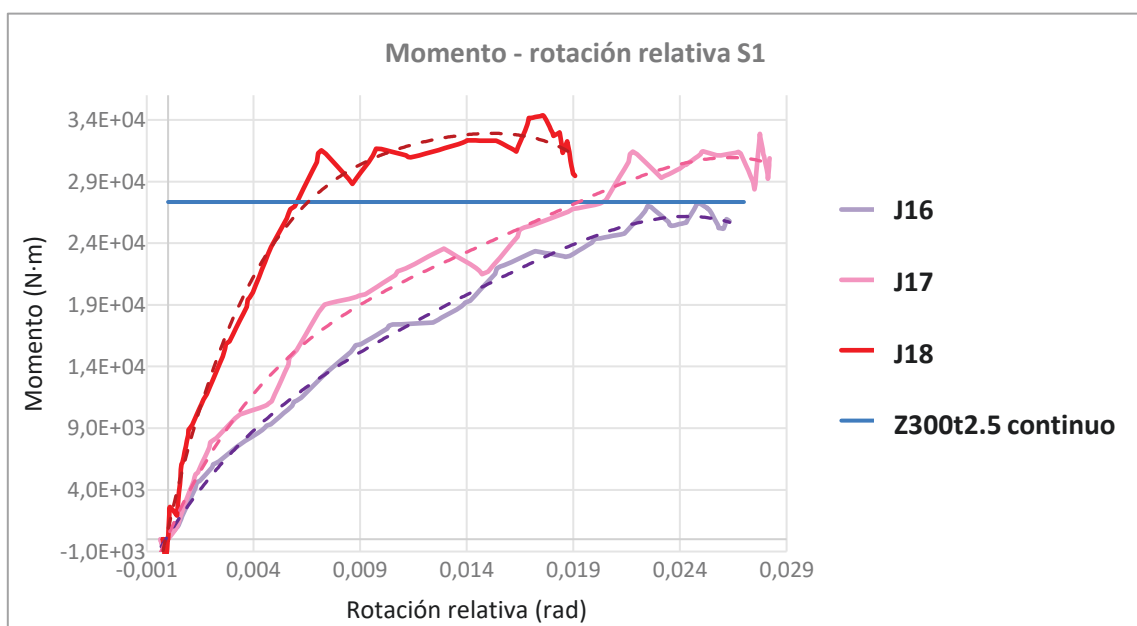


Figura 26. Comparación de las curvas momento - rotación relativa para los modelos J16, J17 y J18. Sección S1. Fuente: elaboración propia

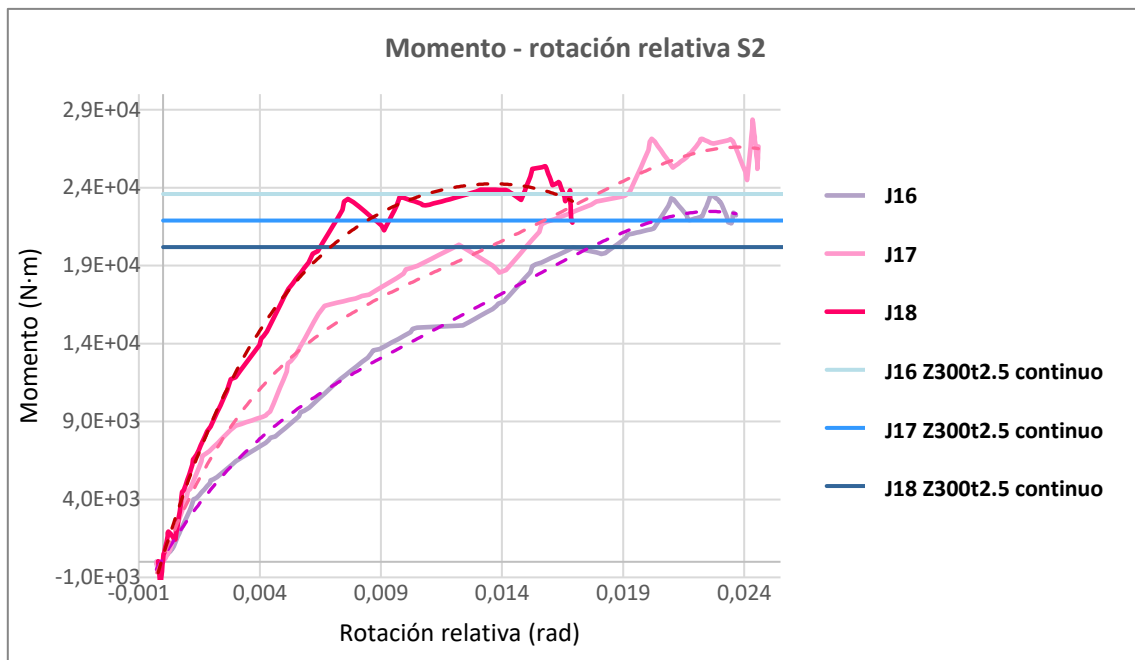


Figura 27. Comparación de las curvas momento - rotación relativa para los modelos J16, J17 y J18. Sección S2. Fuente: elaboración propia

La tendencia general para la comparativa de S1 es que, a mayor longitud de casquillo, más rigidez. Para inducir un giro similar en los tres modelos se necesita un mayor momento para los modelos con longitud de casquillo más grande. Sin embargo, no podemos emplear la comparativa de S2 para argumentar esta afirmación, ya que cada una de las secciones están situadas a distancias distintas del apoyo.

5 PROTOCOLO DE PRUEBAS. REDISEÑO.

En la realización de los modelos anteriores se ha observado que el casquillo sufre tensiones tales que lo dañan, impidiendo que cumpla su función (como en J16, donde plastifica) o provocando que, pese a aguantar, la rigidez pueda ser mejorable. Una posible solución sería aumentar la sección en esa zona para que se pueda mejorar las propiedades resistivas de la unión, siguiendo la deducción hecha en el punto anterior. Para ello, se propone un modelo con doble casquillo que, a diferencia de los modelos propuestos hasta ahora (con un único casquillo), dispondrá de dos casquillos que envuelven por completo a los dos perfiles que se desean unir. Se procederá entonces al rediseño del modelo J17, al cual se le añadirá un segundo casquillo de idéntica longitud al presente, pero con una longitud de las alas distinta con el fin de que encaje en el conjunto, para después simularlo del mismo modo que los modelos anteriores. En la figura que se muestra a continuación se puede apreciar el nuevo montaje, en el cual se intuye el aumento de la sección en la unión:

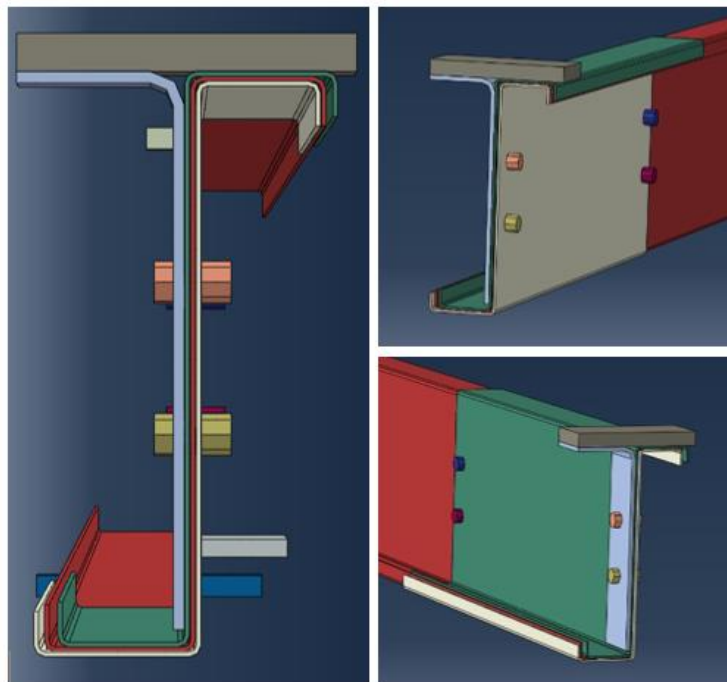


Figura 28. Detalle del montaje de la unión con doble casquillo. Fuente: elaboración propia

Las características principales permanecen invariables. Los perfiles de las correas y del primer casquillo son exactamente los mismos que los del modelo J17 de casquillo simple, y las longitudes de solape $2L_p = 1360 \text{ mm}$, longitud de ensayo $L_s = 6500 \text{ mm}$ y longitud del vano $L = 16000 \text{ mm}$ son las mismas también.

La construcción del modelo J17 con doble casquillo (DC) en ABAQUS es similar a la del J17 de casquillo simple. Sin embargo, la adición de un elemento extra supone un aumento en el coste computacional, repercutiendo en un aumento importante del tiempo de simulación. Para solucionar esto se ha recurrido a modificar el parámetro de *mass scaling*. Para el caso que ahora nos incumbe, el factor introducido para el *mass scaling* es de 2. Esta

solución se podría haber combinado con una modificación del tiempo de simulación. En este caso aumentamos el tiempo de simulación de 3 a 5 segundos. Se ha procedido de esta manera con el fin de encontrar una solución de compromiso entre *mass scaling* y tiempo de simulación, donde un aumento mínimo de *mass scaling* sin modificar el tiempo de simulación comprometía la cuasiestaticidad del modelo.

6 RESULTADOS OBTENIDOS.

Para comprobar que el modelo sigue siendo cuasi – estático, al igual que para los modelos anteriores, se recurrirá a la comparación de las curvas de energía cinética e interna. La primera ha de ser claramente inferior a la segunda para que el modelo sea válido.

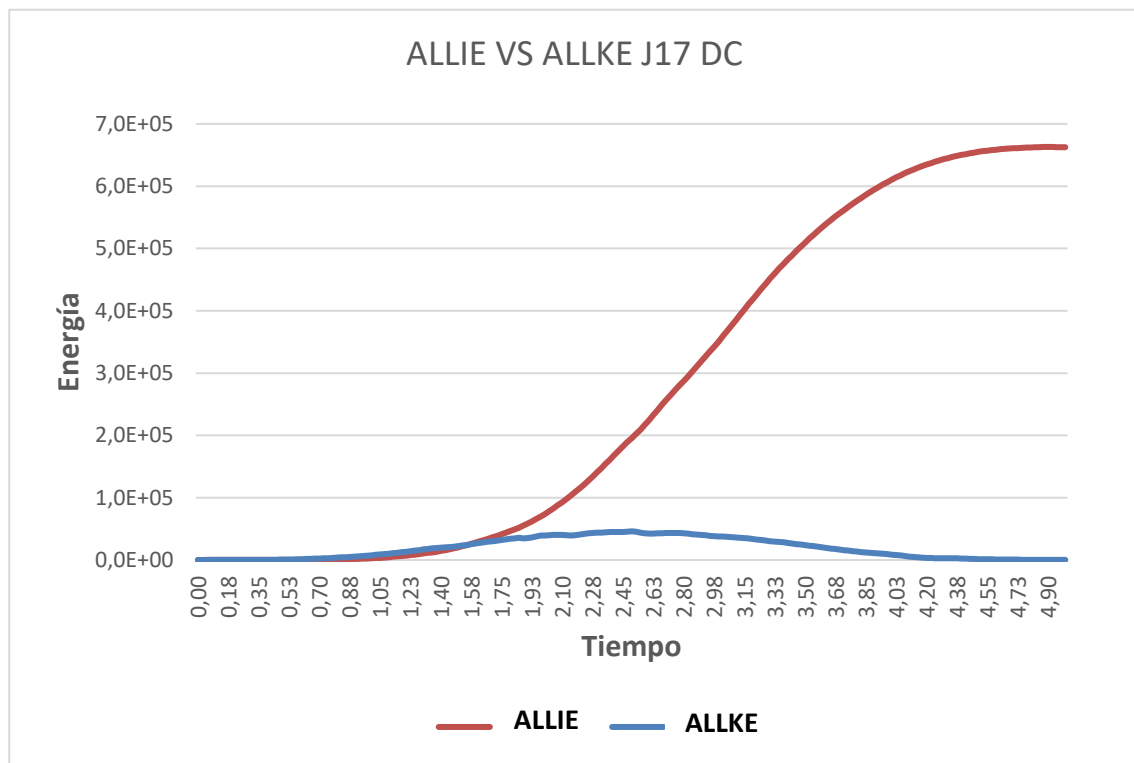


Figura 29. Representación de energía cinética (ALLKE) y de energía interna de deformación (ALLIE) para el modelo J17 con doble casquillo. Fuente: elaboración propia

Se observa que se cumple la condición de cuasiestaticidad. Es importante comprobar esto, sobre todo si se añade *mass scaling*, ya que este aumento artificial de la masa puede hacer más notable las fuerzas de inercia y comprometer la cuasiestaticidad del modelo si se emplea un factor demasiado grande.

Tras esta breve comprobación se procederá a la comprobación del camino de tensiones del modelo. Para considerar este rediseño un éxito, el fallo debería de tener lugar en la propia correa y no en la unión. Recordemos que para los modelos anteriores la línea de tornillos S1 era el punto crítico del diseño. Las tensiones de Von Mises en el modelo J17 DC se muestran en el conjunto de figuras de a continuación, donde nos regimos por el mismo esquema de posicionamiento de imágenes mostrado en los modelos J16, J17 y J18, pero con la diferencia de tener lugar durante los instantes $t = 1,5 s$, $t = 2,5 s$ y $t = 3,3 s$:

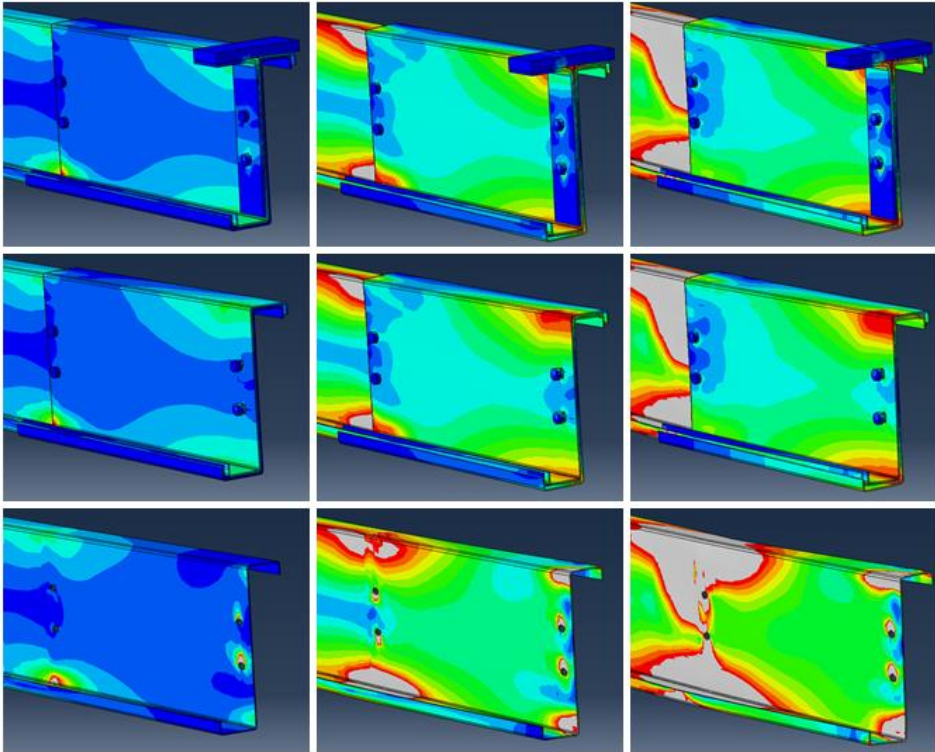


Figura 30. Tensiones de Von Mises en el modelo J17 con doble casquillo (I). Fuente: elaboración propia

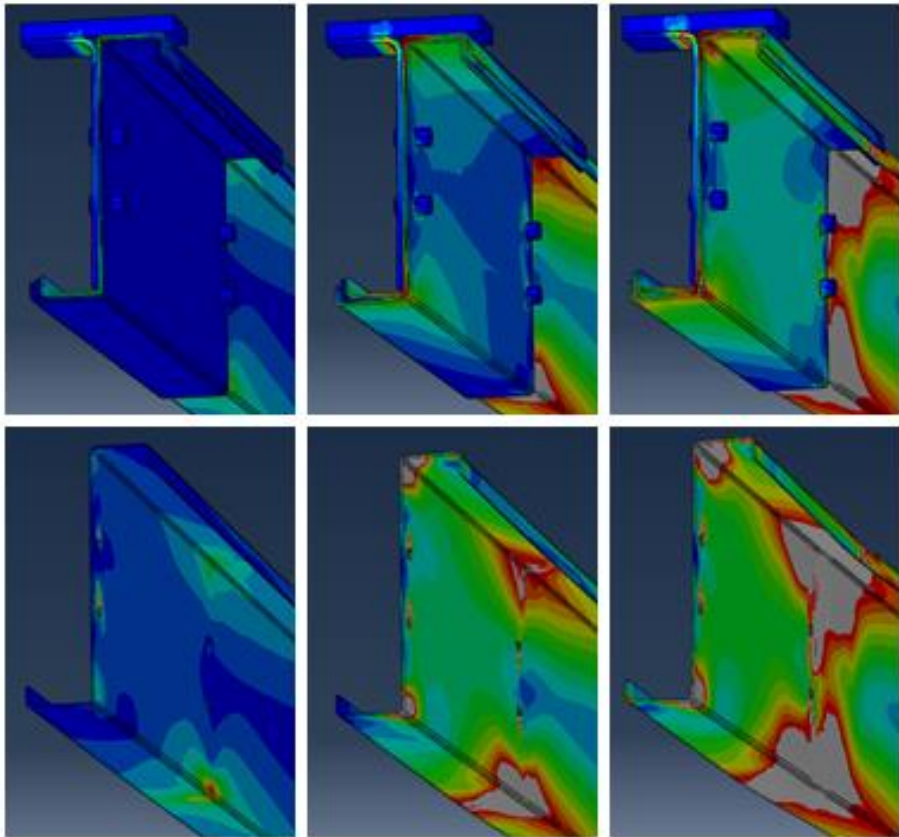


Figura 31. Tensiones de Von Mises en el modelo J17 con doble casquillo (II). Fuente: elaboración propia

Para este caso, el camino de tensiones comienza de la misma manera que los anteriores: de la placa al ejón, que plastifica, y al casquillo 1 (el casquillo equivalente al empleado en el modelo de casquillo simple). De ahí se transmite a la correa, que comienza su deformación. Es a partir de este punto donde encontramos cambios: una vez la correa empieza a deformarse, el segundo casquillo entra en acción aliviando las tensiones en la línea de tornillos S1. De este modo, la rótula se forma en la correa, en la zona de tornillos S2. Los casquillos no llegan a plastificar.

Procedemos ahora al cálculo de las curvas fuerza – desplazamiento. El procedimiento de cálculo es exactamente el mismo. Para el modelo J17 con doble casquillo las curvas quedan de la siguiente manera:

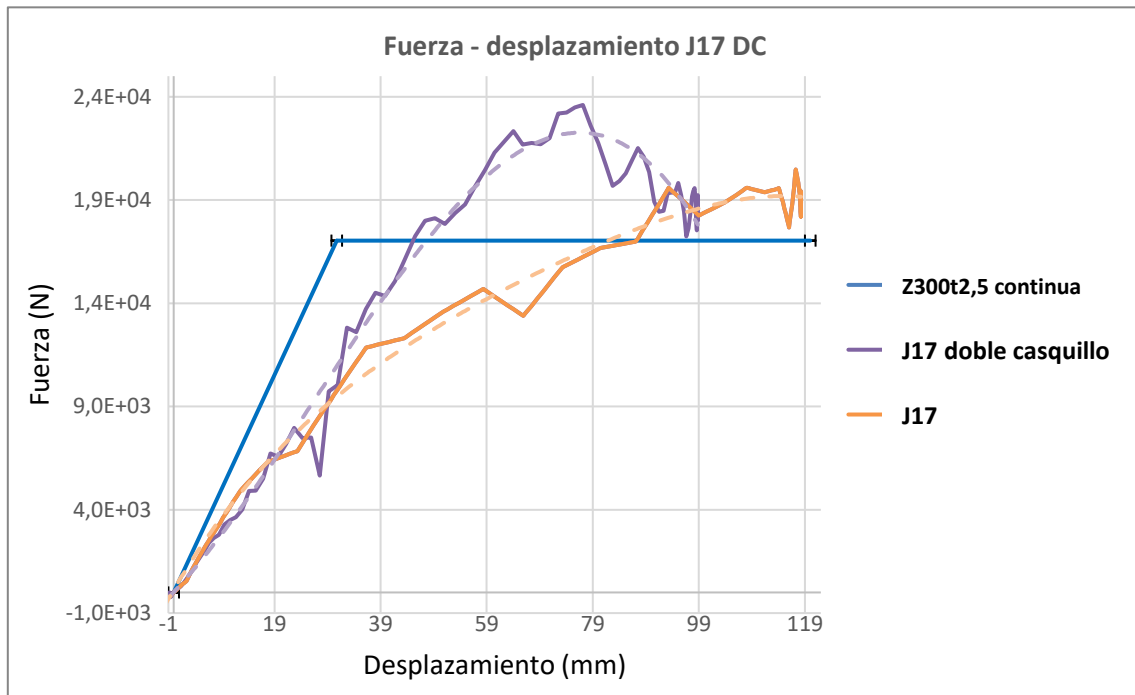


Figura 32. Curvas fuerza - desplazamiento para el modelo J17 con doble casquillo. Comparación con las curvas del modelo J17. Fuente: elaboración propia

Si se compara con el modelo continuo se observa que el modelo J17 con doble casquillo se aproxima más que el de casquillo simple antes de que el modelo continuo plastifique. La adición de un segundo casquillo para el modelo con doble casquillo queda patente ya que al aumentar la sección de la unión permite que se necesiten mayores fuerzas para conseguir el mismo desplazamiento comparado con el modelo de casquillo simple. Sin embargo, el fallo ocurre cuando se da un menor desplazamiento, comparándolo con J17. Esto puede resultar interesante de cara al diseño de la estructura, fijándonos en los desplazamientos permitidos por la normativa a aplicar para *Estado Límite Último* (ELU) o *Estado Límite de Servicio* (ELS).

En cuanto a las curvas momento – rotación, el hecho de haber añadido el segundo casquillo a J17 rigidizó la unión de una manera considerable, hasta tal punto que el cálculo de dichas curvas podría resultar prescindible. Sin embargo, para demostrar tal aumento en la rigidez, se procedió a su cálculo. Se observa que dicha unión es capaz de soportar momentos mayores al del modelo continuo. A continuación, se muestra una comparativa entre las gráficas del modelo continuo, modelo J17 de casquillo simple y J17 de doble casquillo:

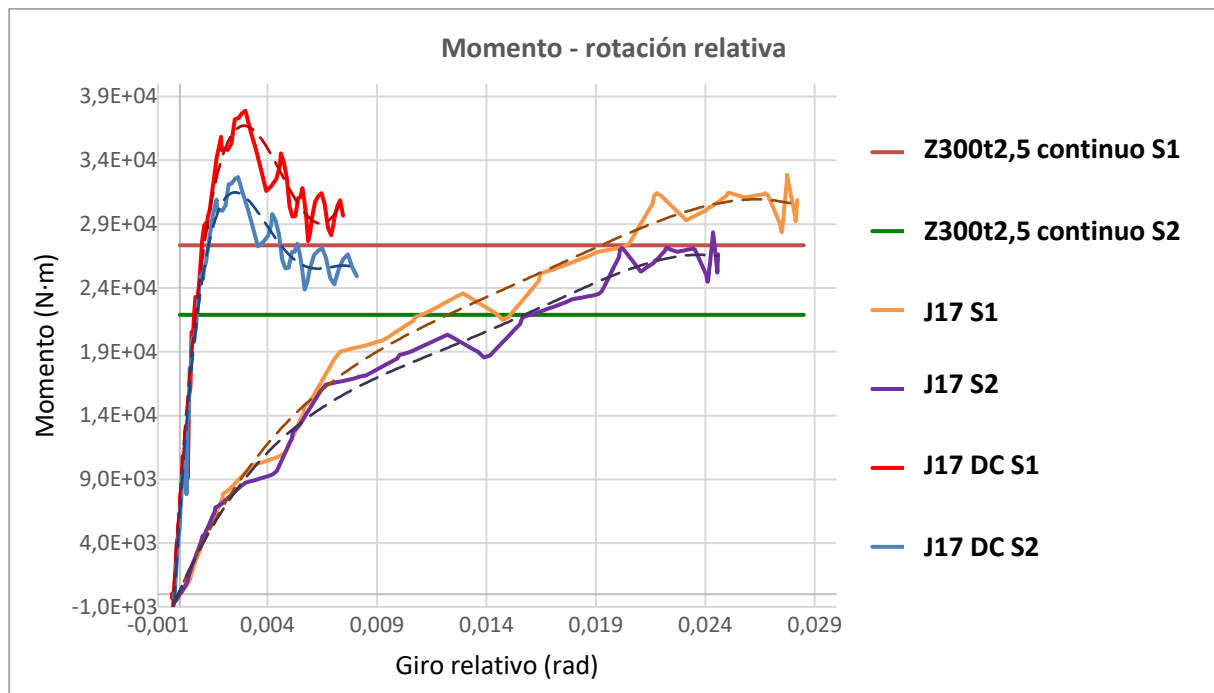


Figura 33. Curvas momento – rotación relativa para el modelo J17 con doble casquillo. Comparación con las curvas del modelo J17. Fuente: elaboración propia

Se observa que el añadir el segundo casquillo al modelo aumentó la rigidez, ya que, para un mismo valor del momento, el giro relativo que se aprecia para el modelo con el doble casquillo llegar a ser aproximadamente la décima parte del giro relativo en J17 con casquillo simple.

7 ESTUDIO DE APLICABILIDAD.

1. Aplicación del prototipo.

La aplicación de este tipo de uniones con doble casquillo resulta de gran interés, especialmente cuando existan luces de longitud importante. Recordemos que el caso en el que se basa el estudio consiste en, de manera esquemática, la aplicación de una carga distribuida equivalente a una carga gravitatoria provocada por la cubierta (consultar figura 2 de la página 6). En estas condiciones de carga nos encontramos que el momento aumenta con el cuadrado de la distancia, lo cual se puede deducir a través del método de integración de la carga. Para un caso de carga distribuida con tres vanos iguales de longitud L , de acuerdo con el prontuario que se adjunta en la bibliografía, el momento máximo es:

$$M_{\max} = -0,1 \cdot qL^2 \quad (15)$$

Otra posible aplicación para el empleo de correas con unión de doble casquillo podría darse a la hora de la renovación o rehabilitación de una estructura para cubierta donde haya elementos que dificulten el trabajo sobre la misma. Sería posible emplear casquillos de menor longitud de solape si los comparamos con los casquillos en una unión simple, facilitando el trabajo y disminuyendo así los costes de mano de obra.

Los dos casos anteriores son casos donde el empleo del doble casquillo podría resultar más favorable en comparación con otros tipos de unión, como pueden ser unión por solape o por casquillo simple. Para casos más generales con luces de menor longitud la unión con doble casquillo puede ser válida también. Se ha procedido al rediseño del modelo J11 empleado como validación añadiendo un segundo casquillo, de la misma longitud de solape que la del modelo de validación. Comparemos las curvas fuerza – desplazamiento obtenidas para los dos casos:

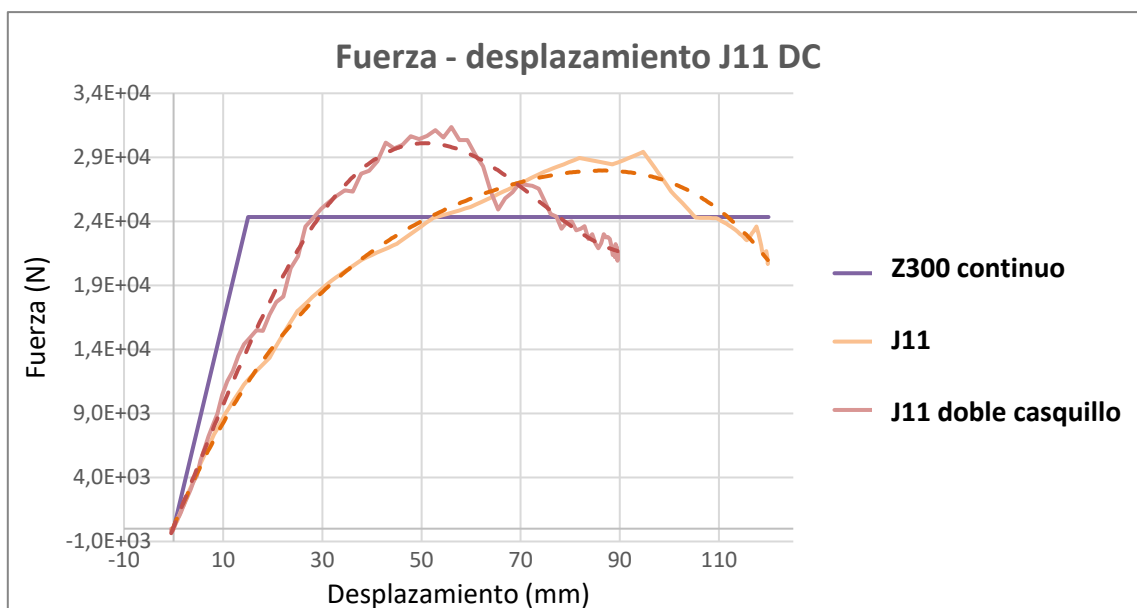


Figura 34. Comparación de las curvas fuerza - desplazamiento para los modelos J11 con casquillo simple y doble casquillo. Fuente: elaboración propia

Al tratarse de un caso con luces más cortas se observa que la diferencia entre el modelo con casquillo simple y el modelo de doble casquillo es menor, pese a seguir experimentando una mejoría. Aun así los desplazamientos en el nuevo modelo son menores, haciendo que el conjunto sea menos propenso a tener desplazamientos verticales. Esto hace viable su utilización en casos donde el diseño de la estructura tenga dificultades a la hora de cumplir valores de giros y flecha máxima admisible, normativa en mano, para los valores de *estado límite último* (ELU) y *estado límite de servicio* (ELS).

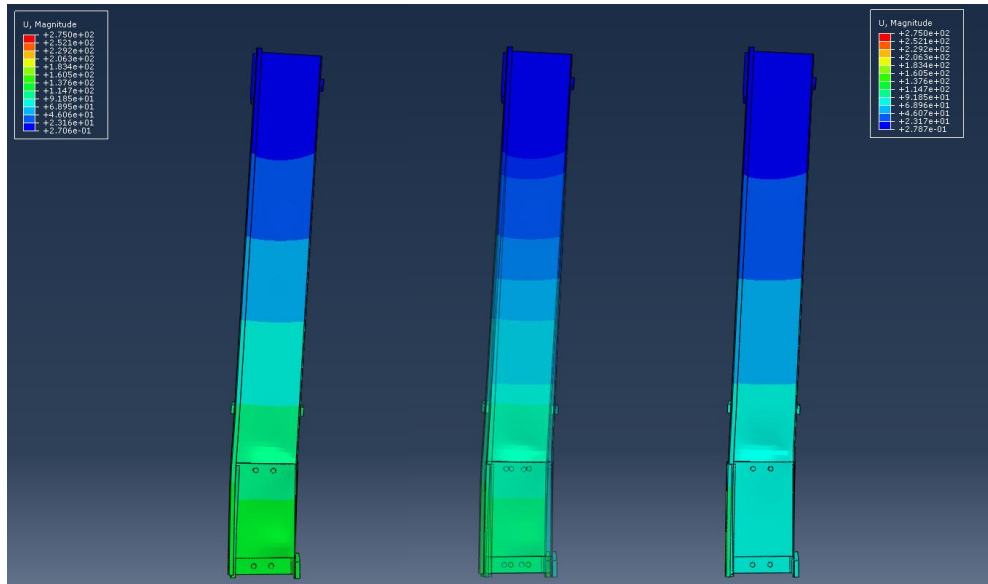


Figura 35. Comparación entre desplazamientos del modelo J11. Fuente: elaboración propia

En esta figura se aprecia la diferencia entre ambos modelos. A la izquierda, el modelo J11 de casquillo simple. A la derecha, el modelo J11 de doble casquillo. En el centro se ha solapado cada uno de los modelos para mostrar el resultado de manera más gráfica.

2. Comparación con sistemas ya existentes.

La adición de un segundo casquillo al tipo de unión estudiada supone una ventaja con respecto a las uniones por solape y por casquillo simple. Si se compara el modelo de doble casquillo (como puede ser el J17 DC), con uno de casquillo simple de mayor longitud de solape (como el J18), se observa que es más eficiente el primero. Es muy interesante sobre todo si observamos la cantidad de material empleado en cada tipo de unión (es bastante similar). Los casquillos sufren menos tensiones en la unión con doble casquillo, y el conjunto es bastante más rígido en general. El doble casquillo es indicado principalmente para vanos de grandes luces ya que, para un modelo de casquillo simple aplicado en tal caso, la longitud de solape necesaria podría ser excesivamente grande. Esto es debido a que en el caso de tener que soportar una carga distribuida como es el caso de una cubierta, el momento aumenta con el cuadrado de la longitud de vano, haciendo de la unión un punto crítico a tratar en este tipo de estructuras.

Para comparar la unión con doble casquillo con la unión por solape sería necesario hacer un estudio de este segundo tipo de unión. Sin embargo, el estudio numérico de uniones por solape no es objetivo de este proyecto, por lo que queda propuesto para proyectos futuros.

8 COSTES.

Un factor importante a tener en cuenta a la hora del diseño de estructuras son los costes de la misma. En la práctica interesa encontrar el diseño más económico que logre alcanzar las especificaciones necesarias para cumplir con seguridad su cometido. Por ello analizaremos el coste de la unión de casquillo simple y doble, además de compararlo con el de la unión con solape.

De los tres tipos de uniones mencionadas, la más económica en el cómputo global es la unión por casquillo simple, seguida por la unión por solape y, por último, la unión de doble casquillo. Para exponer estos datos se ha consultado el precio con una empresa dedicada al diseño y ejecución de estructura metálica. De este modo, se averiguó que el coste de emplear una unión de casquillo simple supone un coste de material de entre 0,9 – 1 €/kg y un coste de montaje de 0,5€/kg. El hecho de que se trata de la unión más simple de realizar de las tres es un factor determinante para que se trate del método más económico para efectuar la unión entre correas.

Por otro lado nos encontramos con que la unión por solape supone un aumento en el precio de entre un 5% y un 10% en comparación con el coste de la unión por casquillo simple. Esto se debe a que se trata de un tipo de unión cuya ejecución es más lenta de efectuar, sumado a que se requiere emplear más cantidad de material para su construcción, implicando tal incremento en los costes.

Por último nos encontramos con la unión de doble casquillo. El coste de material de este tipo de unión supone un aumento del 50% en comparación con la unión de casquillo simple, y un aumento de hasta el 10% en el coste de montaje. Esto se debe a que el segundo casquillo que se le añade a la unión no puede disponer de la misma sección normalizada que la correa y el primer casquillo, requiriendo la fabricación de un diseño personalizado del perfil para poder así encajarlo en la unión. Se trata de la principal desventaja de la unión de doble casquillo.

Algunos de los razonamientos expuestos cuando hablamos de la unión por casquillo simple y de la unión por solape nos los podemos encontrar en el catálogo *Lightweight purlins* mencionado en la bibliografía. El resto de razonamientos, junto con los precios y porcentajes arrojados fueron consultados con la empresa a la que nos referimos anteriormente. Sin embargo, este tipo de datos no suelen ser publicados debido a la existencia de secreto industrial. Este es el motivo por el cual la empresa no es mencionada.

Con respecto a qué tipo de unión emplear, depende de las circunstancias de cada diseño. Los datos obtenidos en este proyecto nos muestran que en cuanto a efectividad la unión más rígida entre casquillo simple y doble casquillo es esta segunda. Sin embargo, el hecho de que el coste suponga un aumento de hasta el 50% hace que en algunos casos la unión por casquillo simple sea más que suficiente. Es por eso que a la hora de decidir si escoger otro tipo de unión o la unión de doble casquillo entran en juego otros factores que, si son de suficiente peso, podrían hacer decantarse por este tipo de unión con formidables propiedades resistivas.

9 CONCLUSIONES.

Con este estudio podemos concluir que:

- Se pudo recrear con el programa ABAQUS, empleando su módulo *Explicit*, el ensayo planteado en el documento *Numerical study of purlin joints with sleeve connections* para uniones de correas mediante unión de casquillo.
- El empleo del tipo de unión estudiado en este trabajo con un dimensionamiento pobre del casquillo puede implicar, tal y como se observa en el modelo J16, un fallo prematuro por plastificación del casquillo en la estructura.
- La manera de solucionar el problema mencionado anteriormente se puede conseguir aumentando la sección del conjunto en la zona de la unión.
- Se puede mejorar la capacidad resistiva de la unión aumentando la longitud de solape ($2L_p$) en el caso de la unión de casquillo simple.
- Añadir un segundo casquillo aumenta más todavía la capacidad resistiva de la unión, haciéndola más rígida y solucionando los inconvenientes de los modelos con casquillo simple al aumentar la sección en la zona de la unión.
- El empleo de la unión de doble casquillo es una solución poco económica, pero sus propiedades resistivas puede ser un factor de peso lo suficientemente grande como para decantarse por este tipo de unión.

A partir de este proyecto se pueden plantear una serie de propuestas que sirvan para la ampliación de este estudio numérico como, por ejemplo:

- Elaboración de un modelo con muelles rotacionales a partir de las curvas momento – rotación relativa calculadas para los modelos propuestos.
- Estudio numérico de la unión por solape para correas esbeltas de acero conformado en frío con múltiples vanos, con el fin de comparar en profundidad los resultados con los obtenidos en este proyecto.
- Propuesta de una alternativa a la unión por solape o unión de casquillo para correas esbeltas de acero conformado en frío, con vanos de grandes luces.

10 BIBLIOGRAFÍA.

- Jacob, P., Goulding, L., (2002), *An Explicit Finite Element Primer*. NAFEMS Ltd.
- Gutiérrez, R., Loureiro, A., Reinosa, J. M. y López, M., (2015). *Numerical study of purlin joints with sleeve connections*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263823115001330?via%3Dihub>
- Gutiérrez, R., Loureiro, A., Reinosa, J. M. y López, M., (2019). *Numerical study of semi – rigid behaviour joints for slender purlins*.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/cepa.1049>
- Abaqus/CAE User's Guide: <http://ivt-abaqusdoc.ivt.ntnu.no:2080/v6.14/books/usi/default.htm>
- Mass scaling: <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEANLRefMap/simaanl-c-massscaling.htm>
- Explicit Dynamic analysis: <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEANLRefMap/simaanl-c-expdynamic.htm>
- Ruuki (2011). *Lightweight Purlins*. Rautaruuki Corp.
<https://www.ruukki.com/docs/default-source/b2b-documents/load-bearing-sheets/lightweight-purlins/lightweight-purlin-technical-manual.pdf?sfvrsn=20637275676580930000>
- Prontuario básico de estructuras simples.
<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/25612/1/Estructuras%20Met%C3%A1licas%20-%20Material%20apoyo.pdf>



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

**TRABAJO FIN DE GRADO
CURSO 2019/2020**

*Estudio numérico de la unión de casquillo para correas
esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en
frío.*

Grado en Ingeniería Mecánica

Documento II

PLANOS

4 3 2 1

F

F

E

E

D

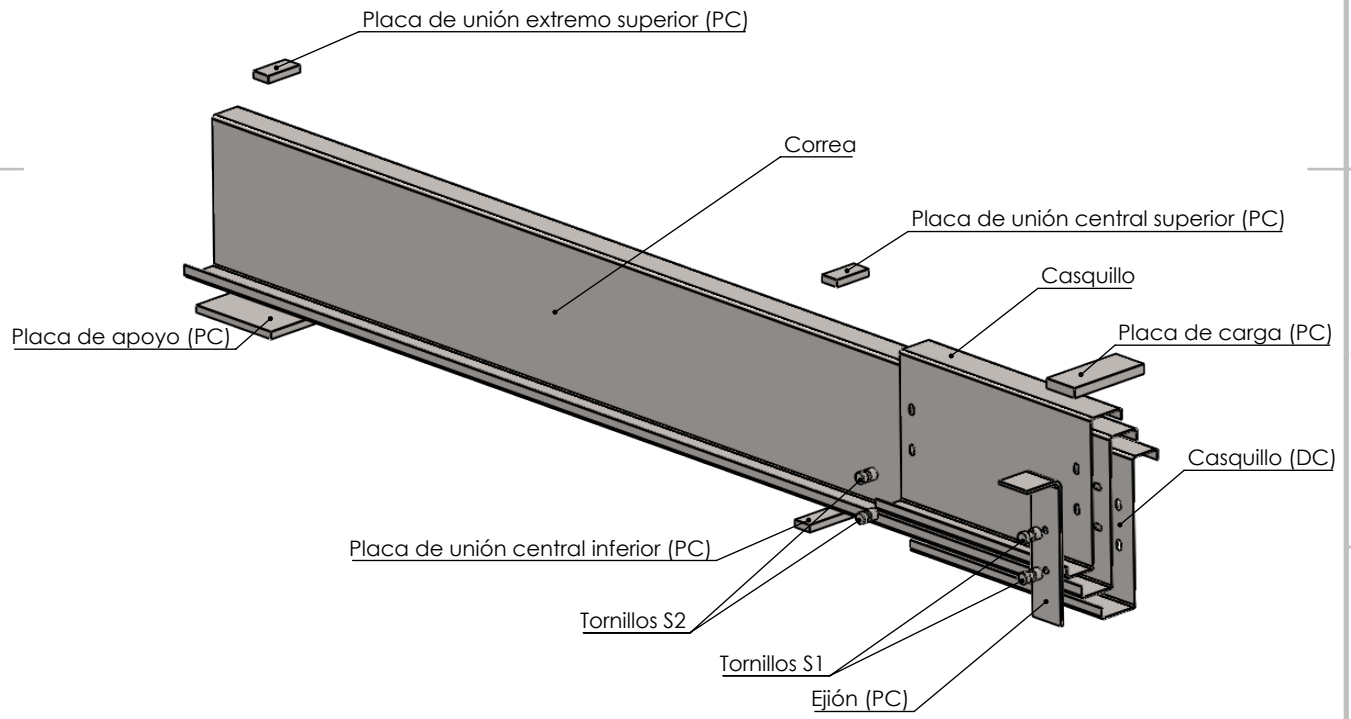
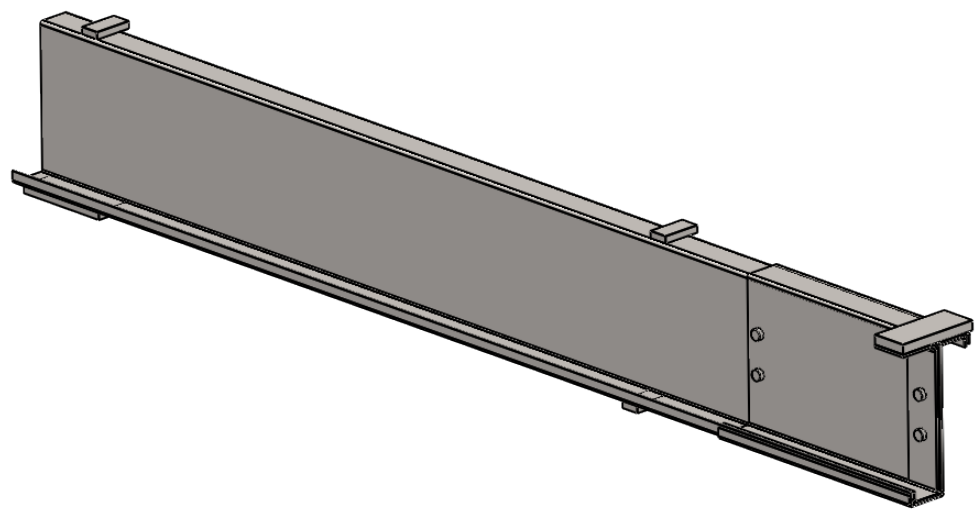
D

C

C

B

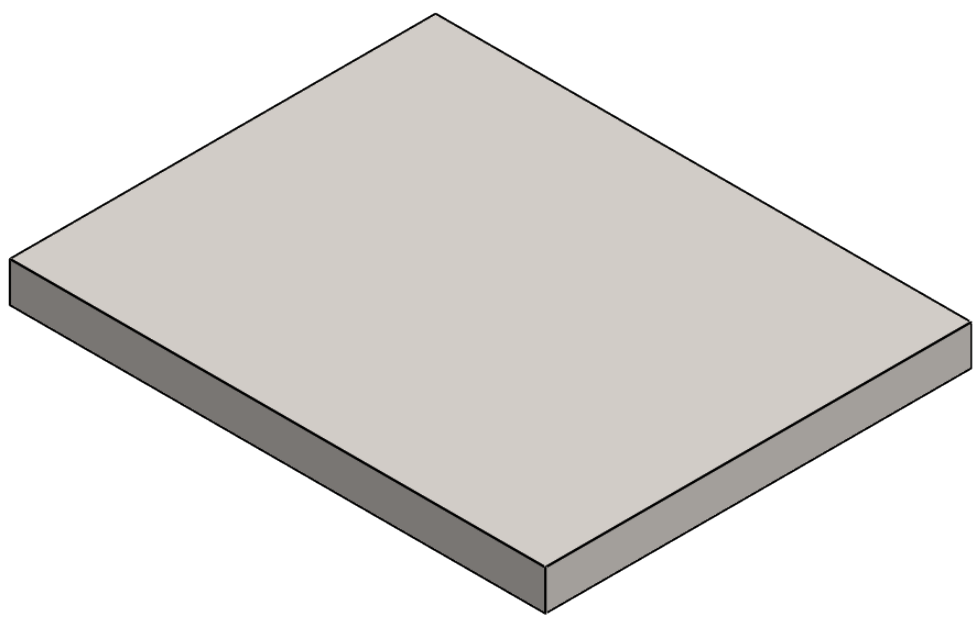
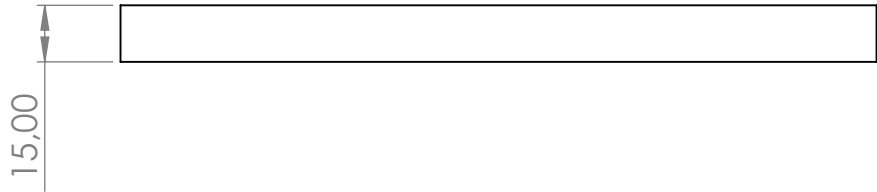
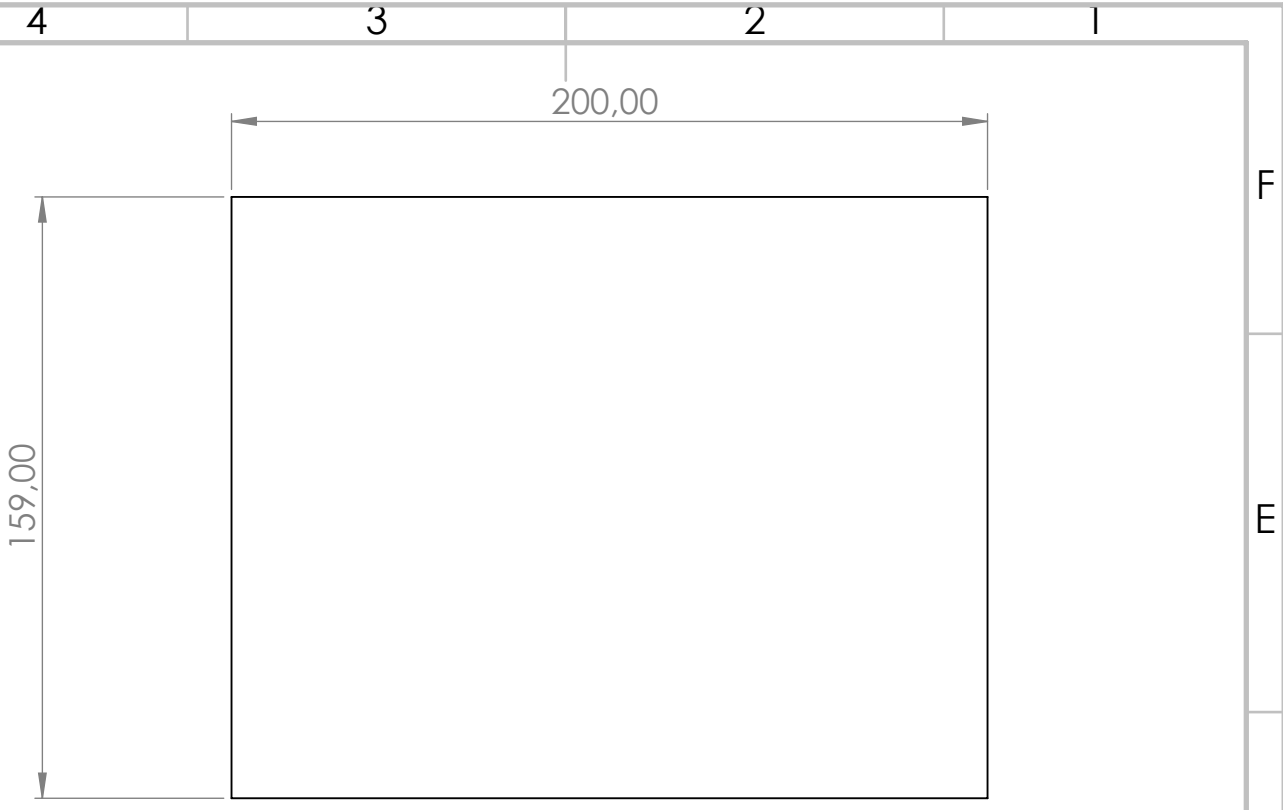
B



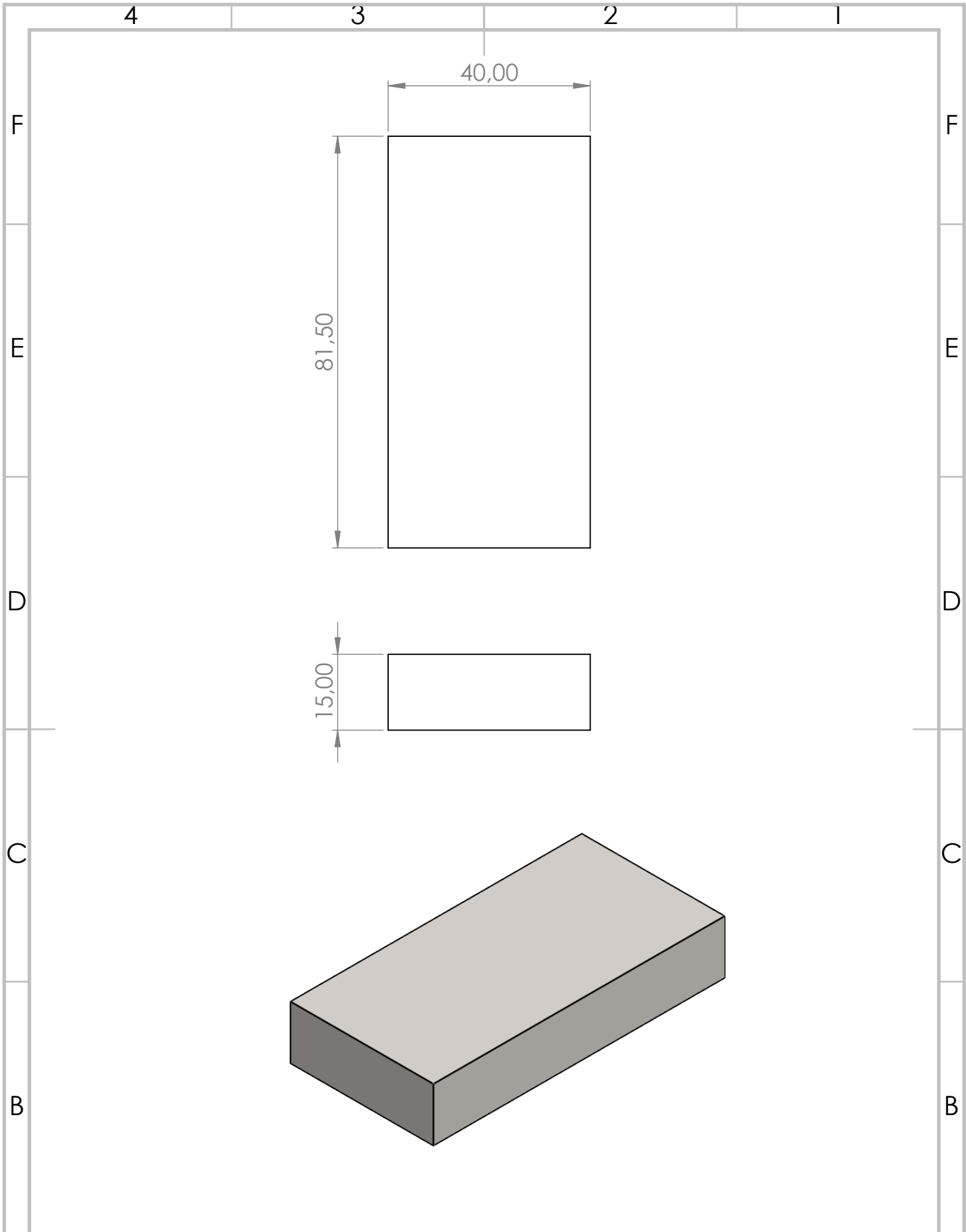
PC - Piezas comunes
 DC - Doble casquillo

A		NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO DEL PROYECTO:	A
	DIBUJADO:	Pablo Rama		03/09/2020	<i>Estudio numérico de la unión de casquillo para correas esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en frío.</i>	
	REVISADO:					
	UDC	N.º DE DIBUJO			TÍTULO DEL PLANO:	
		Dibujo 1			Piezas	
		Cotas en mm	A4	ESCALA:1:14	HOJA 1 DE 1	

4 3 2 1



A	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO DEL PROYECTO: <i>Estudio numérico de la unión de casquillo para correas esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en frío.</i>	A
	DIBUJADO:	Pablo Rama	03/09/2020		
	REVISADO:				
A	N.º DE DIBUJO	Dibujo 2		TÍTULO DEL PLANO:	Placa de apoyo (PC)
	UDC			ESCALA:1:2	
	Cotas en mm	A4			



A	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO DEL PROYECTO:	A
	DIBUJADO:	Pablo Rama	03/09/2020	<i>Estudio numérico de la unión de casquillo para correas esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en frío.</i>	
	REVISADO:				
UDC	N.º DE DIBUJO	Dibujo 3		TÍTULO DEL PLANO:	A
	Cotas en mm	A4	ESCALA:1:1	Placa de unión extremo superior (PC)	
				HOJA 1 DE 1	

4 3 2 1

F

F

E

E

D

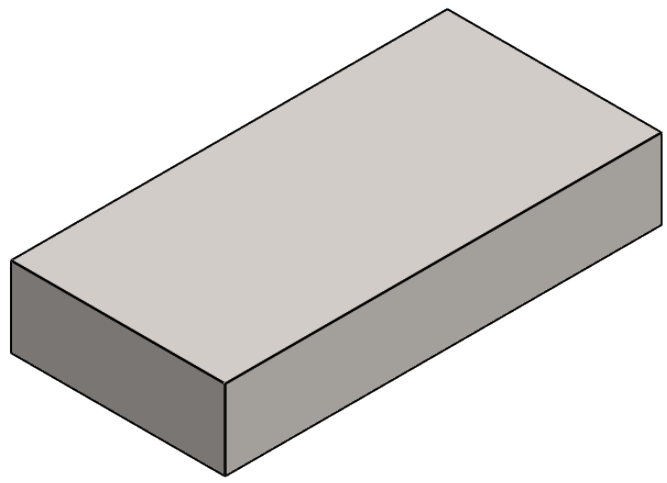
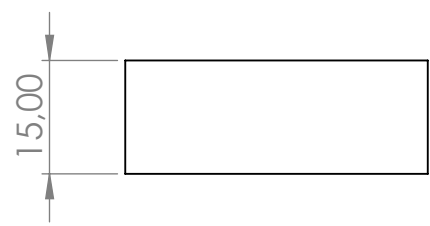
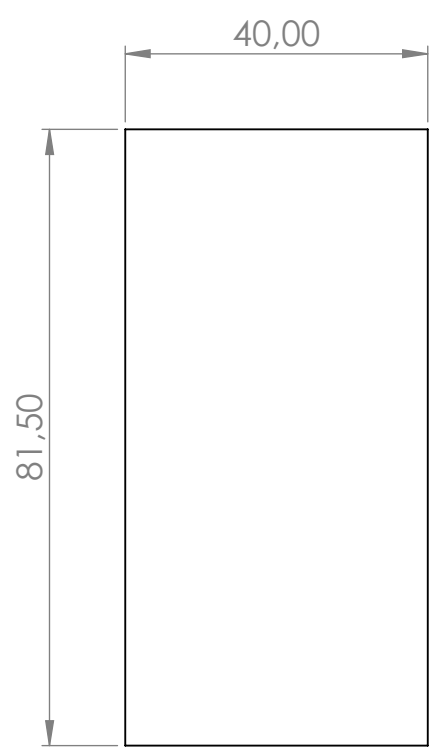
D

C

C

B

B

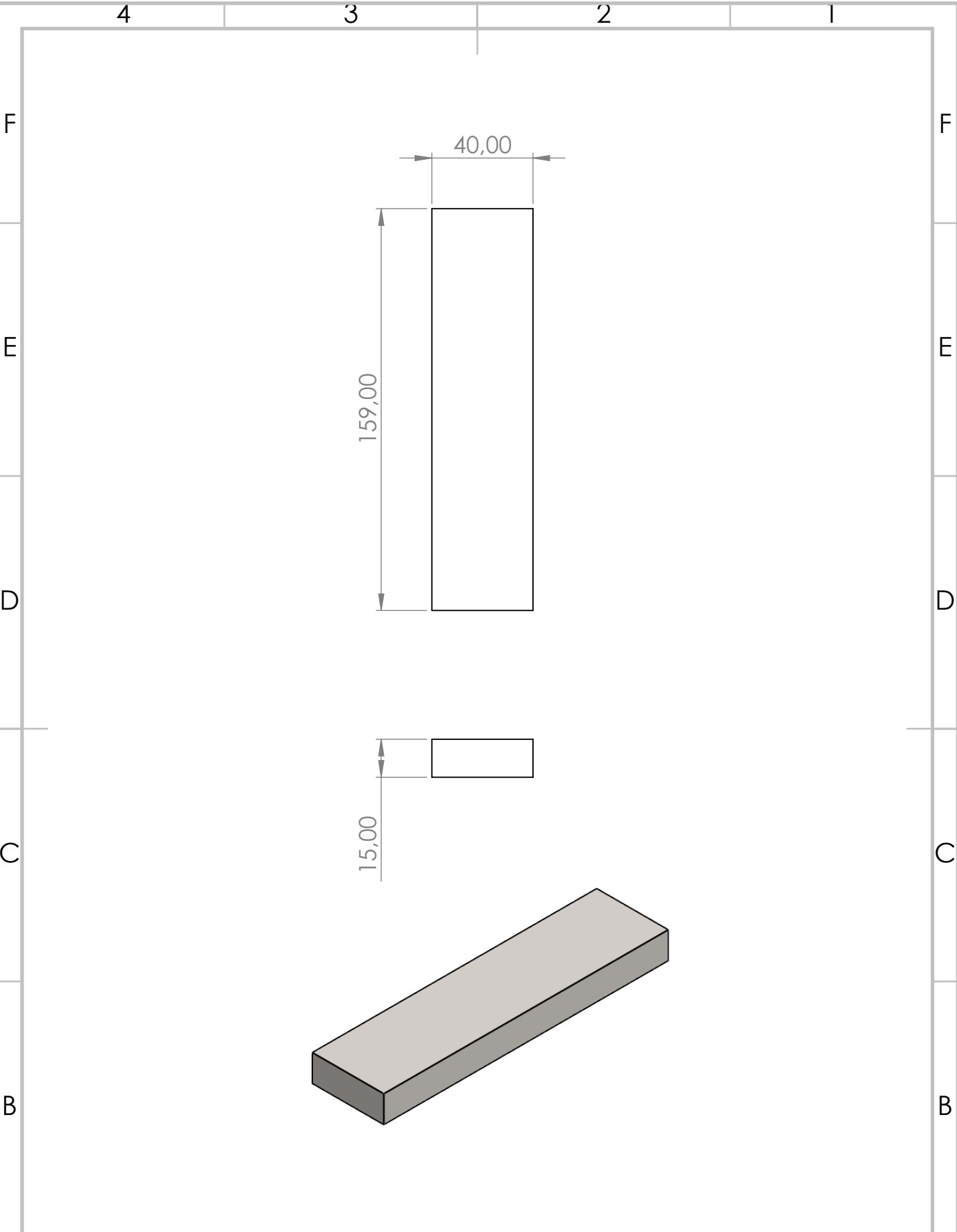


A

A

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO DEL PROYECTO:
DIBUJADO:	Pablo Rama		03/09/2020	<i>Estudio numérico de la unión de casquillo para correas esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en frío.</i>
REVISADO:				
UDC	N.º DE DIBUJO			TÍTULO DEL PLANO:
	Dibujo 4			Placa de unión central superior (PC)
	Cotas en mm		A4	ESCALA:1:1
				HOJA 1 DE 1

4 3 2 1



A	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO DEL PROYECTO: <i>Estudio numérico de la unión de casquillo para correas esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en frío.</i>	A
	DIBUJADO:	Pablo Rama	03/09/2020		
	REVISADO:			TÍTULO DEL PLANO: Placa de unión central inferior (PC)	
	UDC	Dibujo 5		ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1
	Cotas en mm	A4			

4 3 2 1

F

F

E

E

D

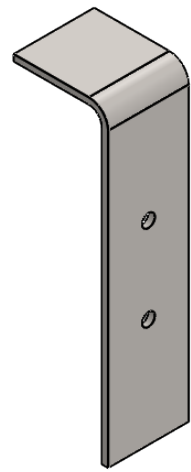
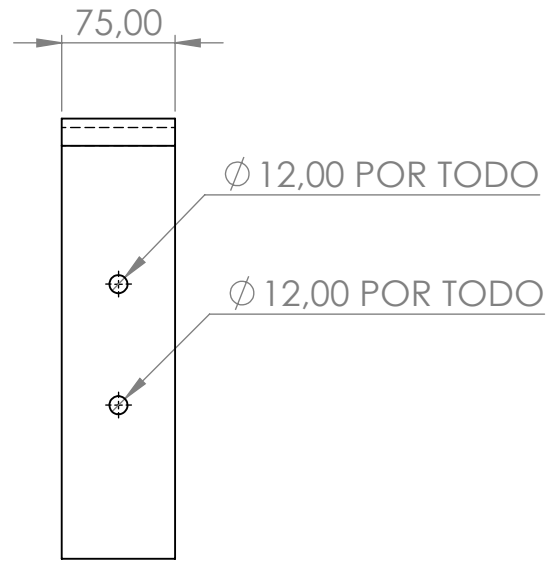
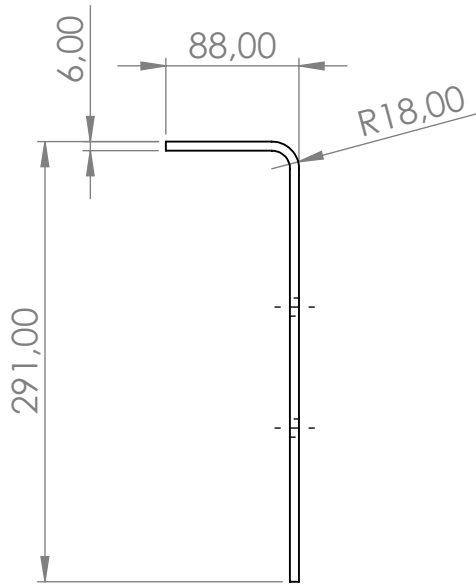
D

C

C

B

B

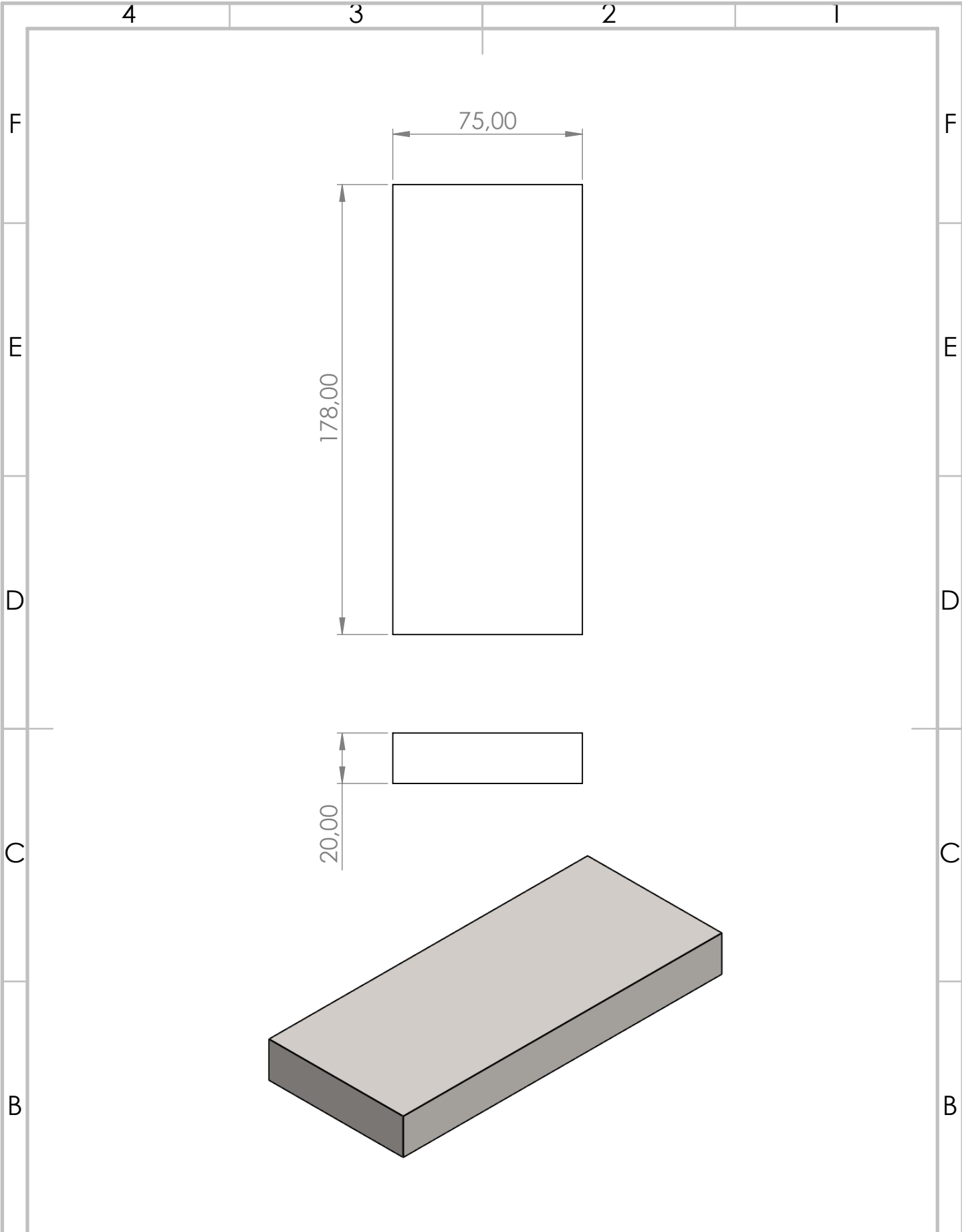


A

A

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJADO:	Pablo Rama		03/09/2020
REVISADO:			
UDC	N.º DE DIBUJO		
	Dibujo 6		
	Cotas en mm		A4

TÍTULO DEL PROYECTO:	<i>Estudio numérico de la unión de casquillo para correas esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en frío.</i>
TÍTULO DEL PLANO:	
ESCALA: 1:5	HOJA 1 DE 1



A	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO DEL PROYECTO:	A
	DIBUJADO:	Pablo Rama	03/09/2020	<i>Estudio numérico de la unión de casquillo para correas esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en frío.</i>	
	REVISADO:				
UDC	N.º DE DIBUJO	Dibujo 7		TÍTULO DEL PLANO:	Placa de carga (PC)
	Cotas en mm	A4	ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1	

4 3 2 1

F

F

E

E

D

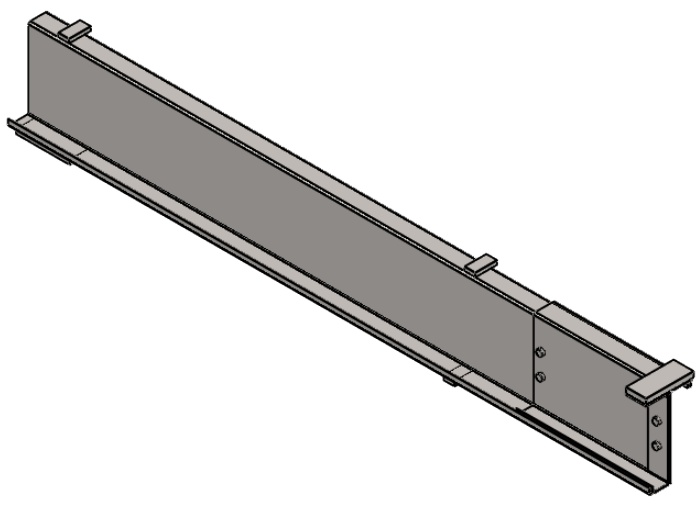
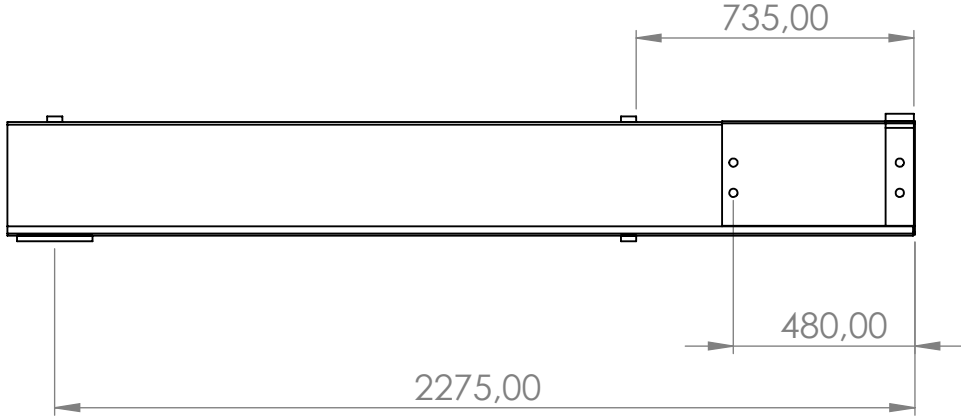
D

C

C

B

B

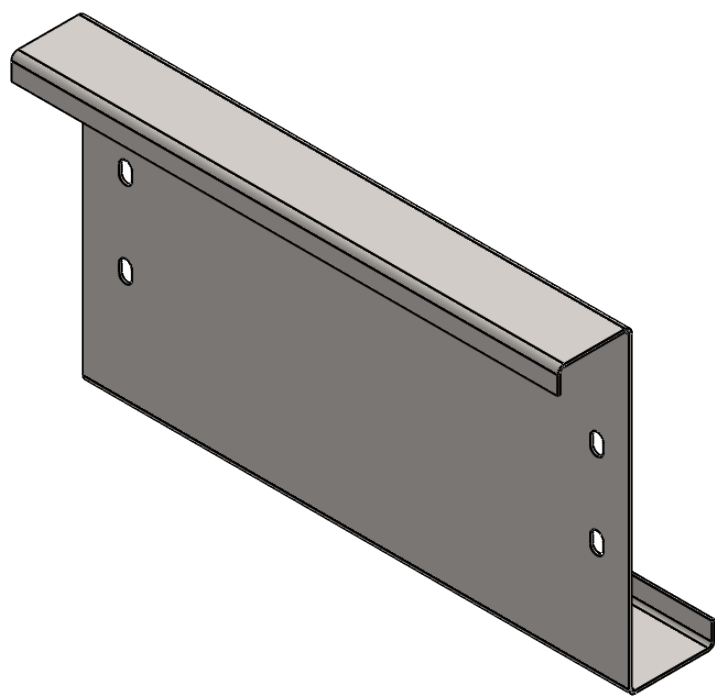
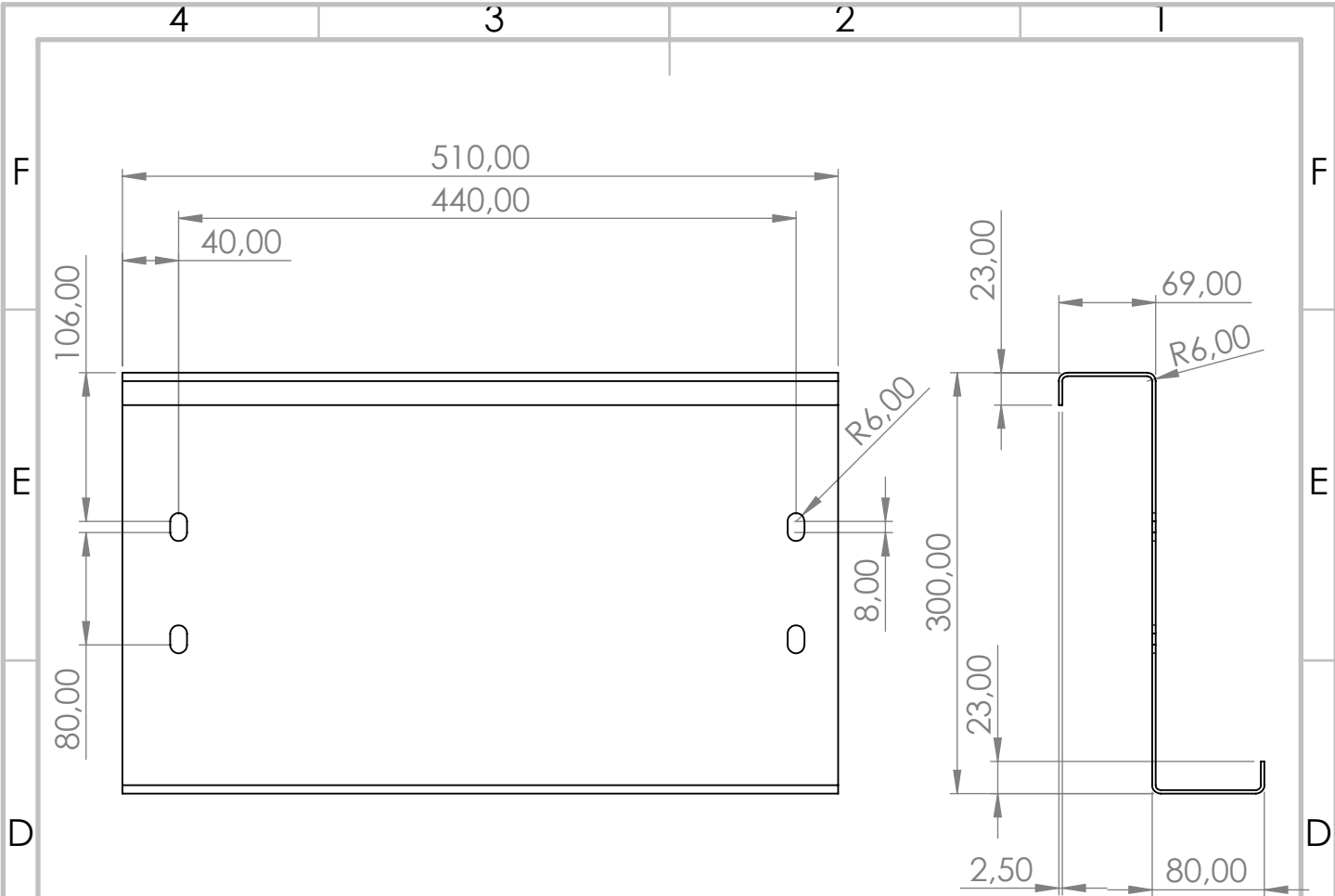


A

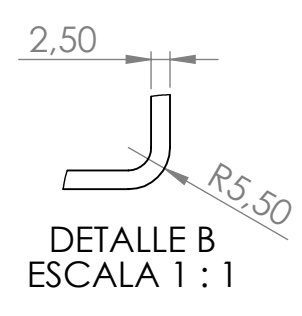
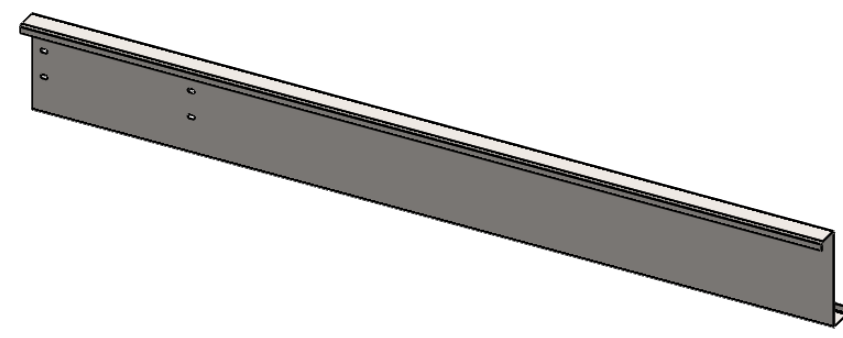
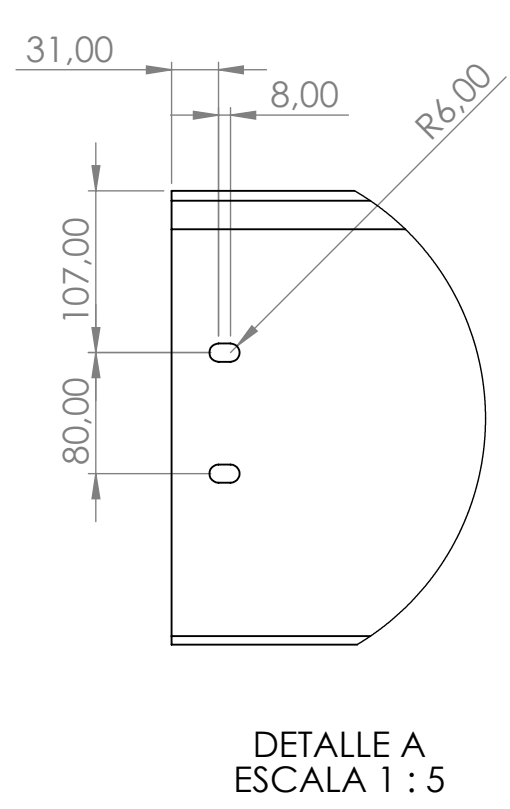
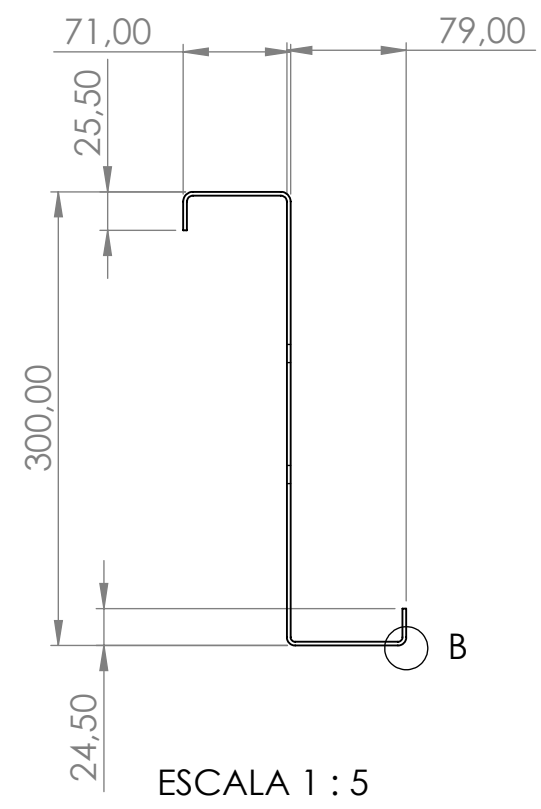
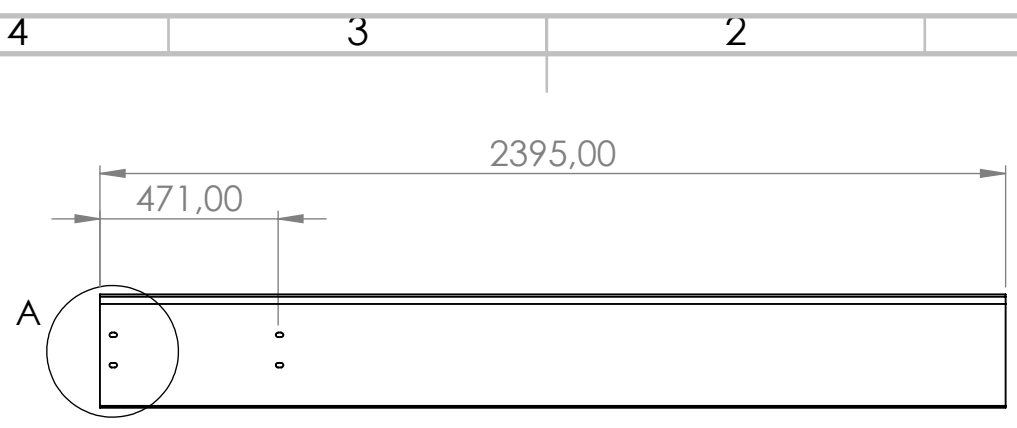
A

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO DEL PROYECTO:
DIBUJADO:	Pablo Rama		03/09/2020	<i>Estudio numérico de la unión de casquillo para correas esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en frío.</i>
REVISADO:				
UDC	N.º DE DIBUJO			TÍTULO DEL PLANO:
	Dibujo 8			Modelo J11
	Cotas en mm		A4	ESCALA:1:20
				HOJA 1 DE 1

4 3 2 1



A	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO DEL PROYECTO:	A
	DIBUJADO:	Pablo Rama	03/09/2020	<i>Estudio numérico de la unión de casquillo para correas esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en frío.</i>	
	REVISADO:				
A	N.º DE DIBUJO	Dibujo 9		TÍTULO DEL PLANO:	A
	UDC			Casquillo J11 Z300t2.5	
	Cotas en mm	A4	ESCALA:1:5	HOJA 1 DE 1	

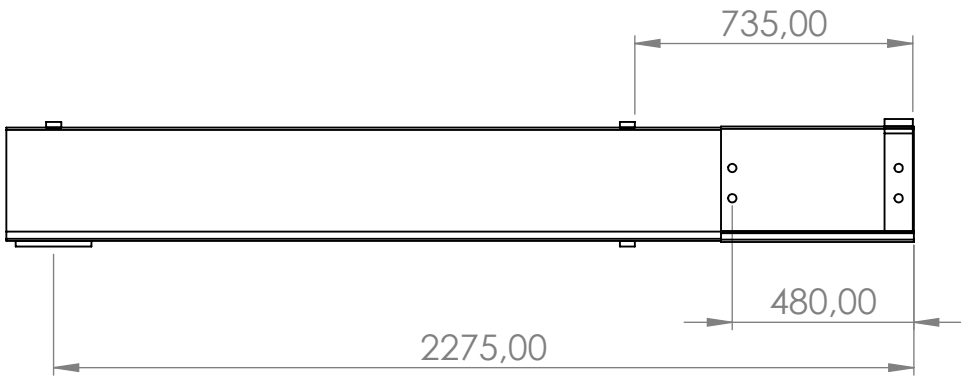


	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO DEL PROYECTO:
DIBUJADO:	Pablo Rama		03/09/2020	<i>Estudio numérico de la unión de casquillo para correas esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en frío.</i>
REVISADO:				
A	N.º DE DIBUJO	Dibujo 10		TÍTULO DEL PLANO:
	UDC			Correa J11 perfil Z300t2.5
	Cotas en mm	A4	ESCALA:1:20	HOJA 1 DE 1

4 3 2 1

F

F

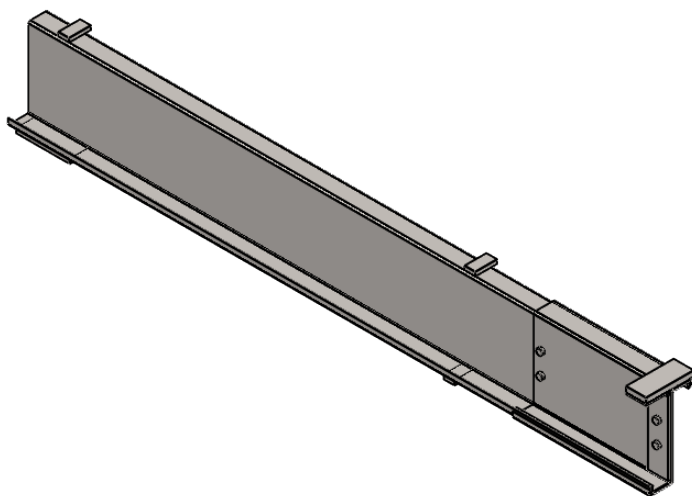


E

E

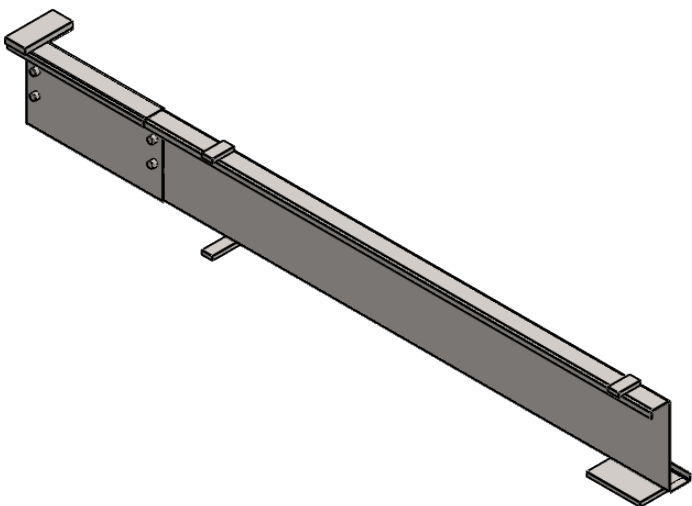
D

D



C

C



B

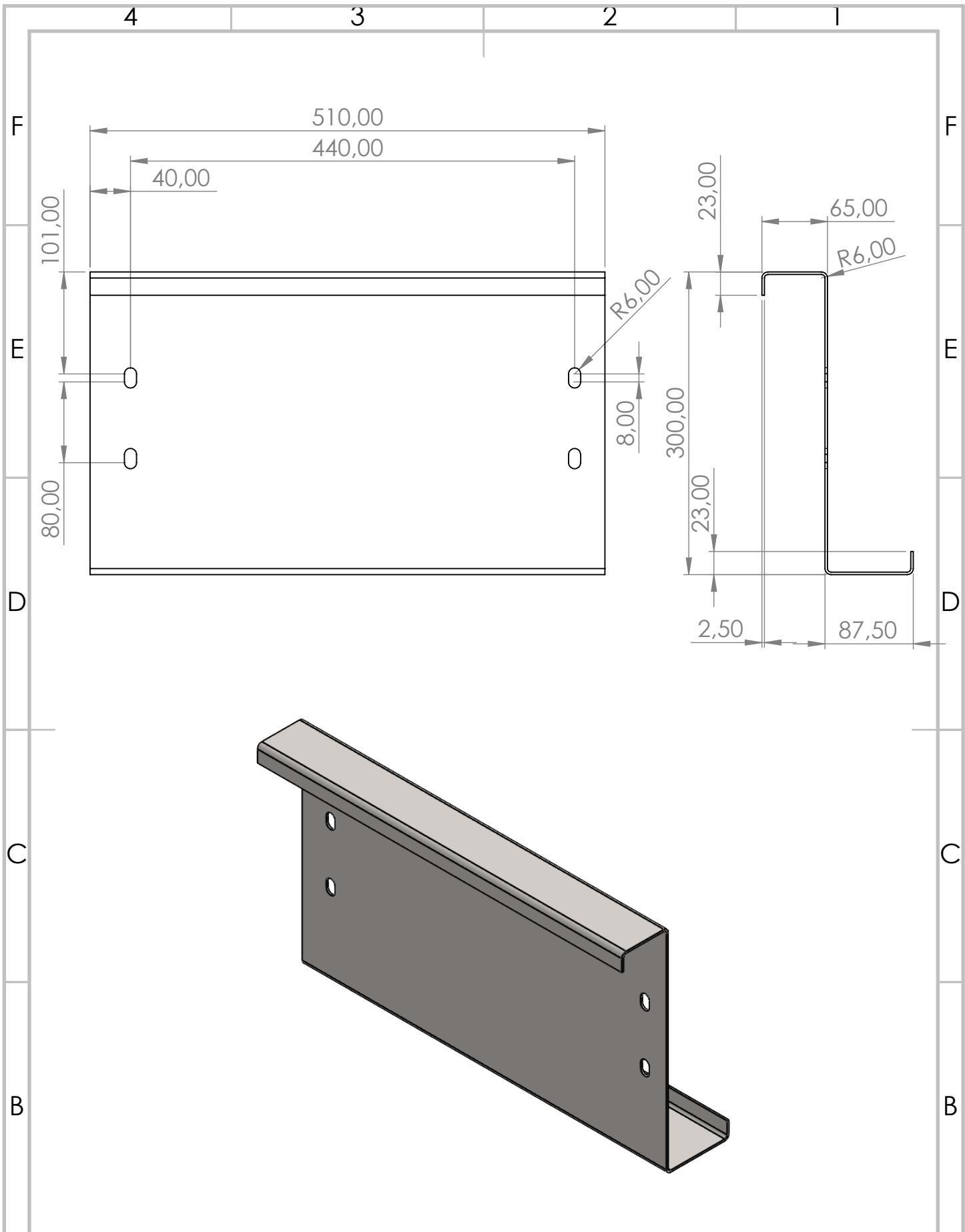
B

A

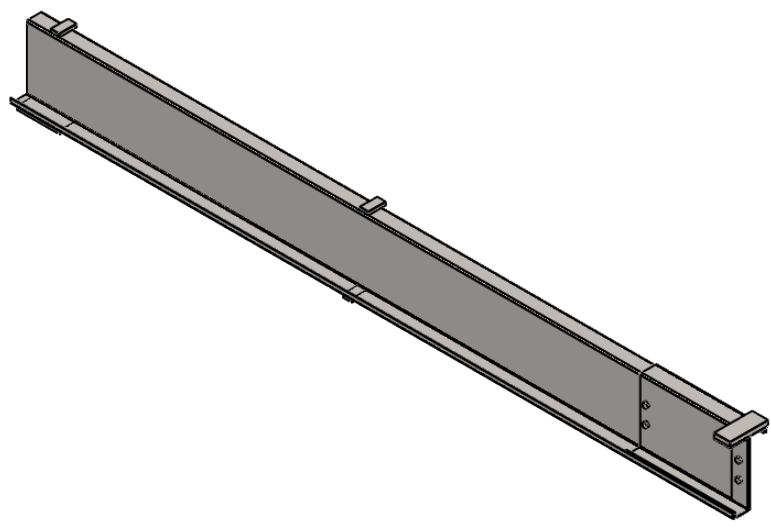
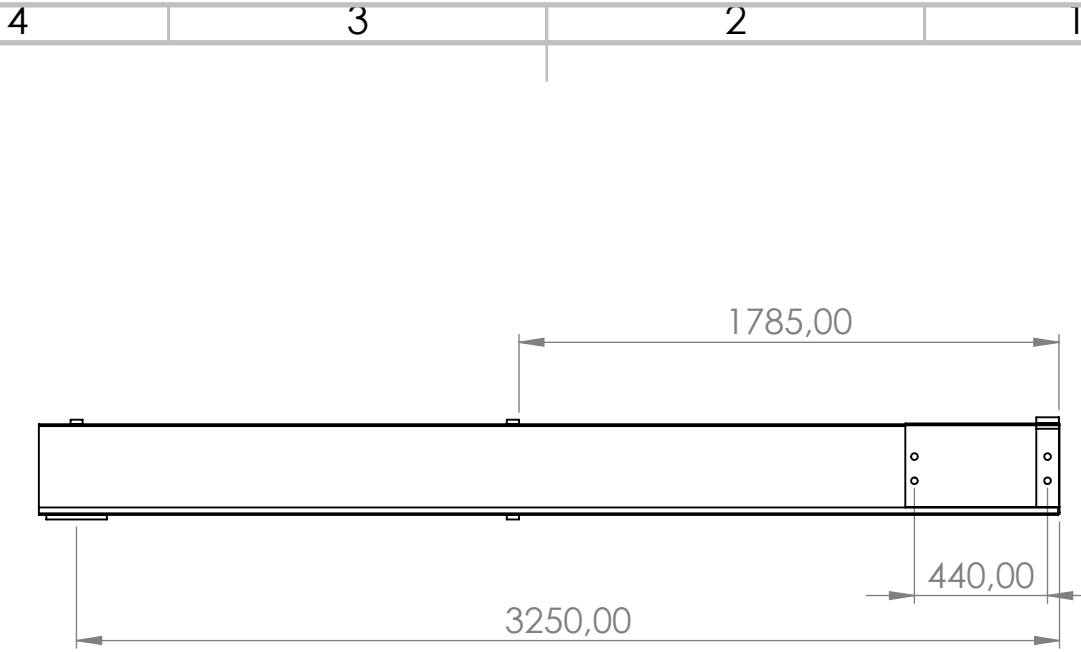
A

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO DEL PROYECTO:
DIBUJADO:	Pablo Rama		03/09/2020	<i>Estudio numérico de la unión de casquillo para correas esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en frío.</i>
REVISADO:				
UDC	N.º DE DIBUJO	Dibujo 11		
		Modelo J11 Doble Casquillo (DC)		
	Cotas en mm	A4	ESCALA:1:20	HOJA 1 DE 1

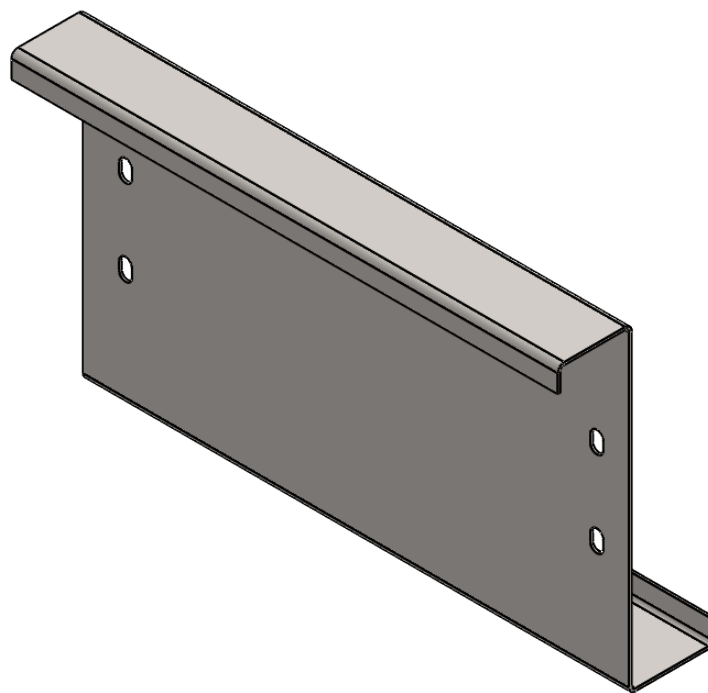
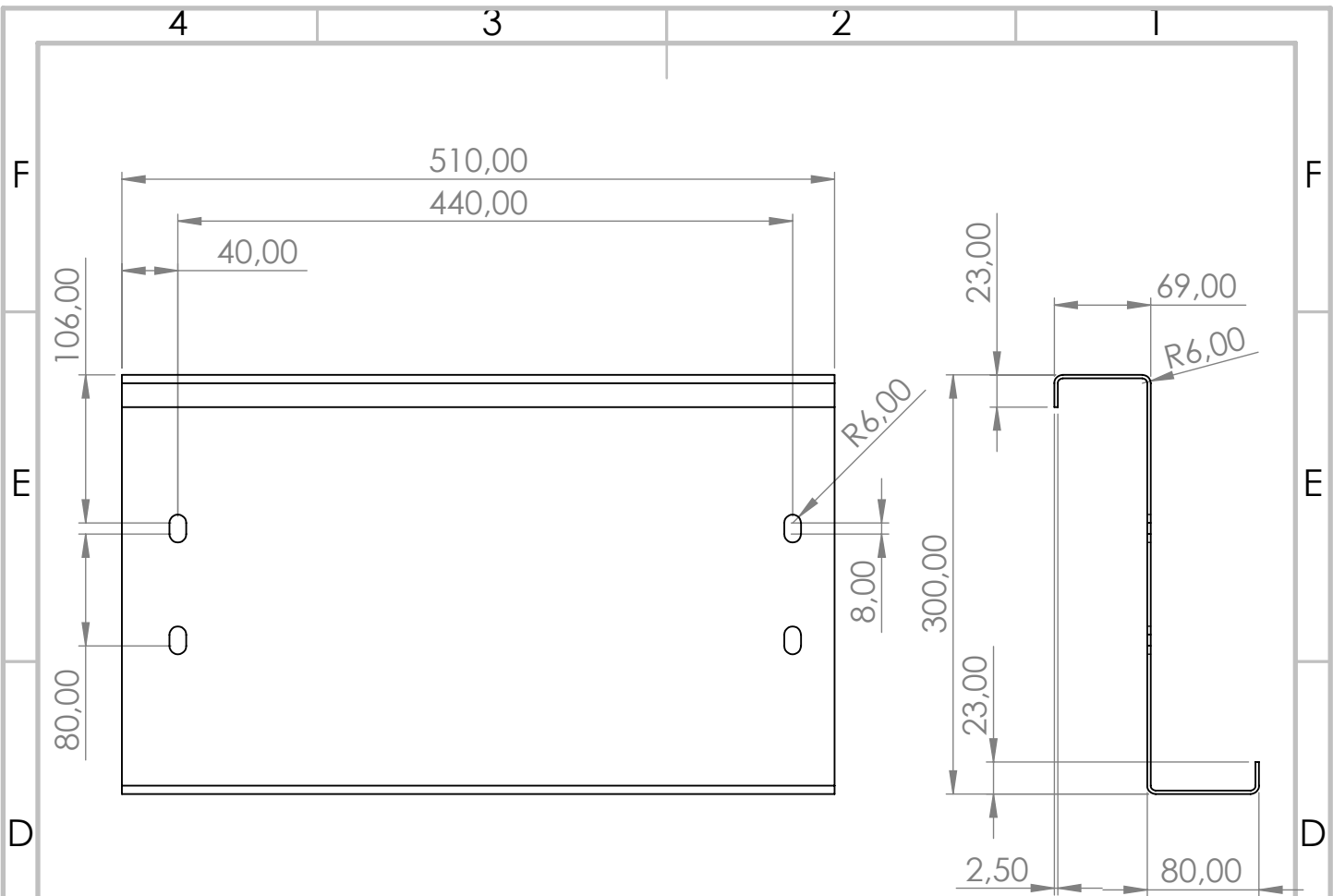
4 3 2 1



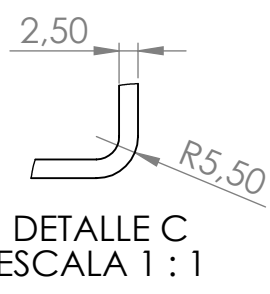
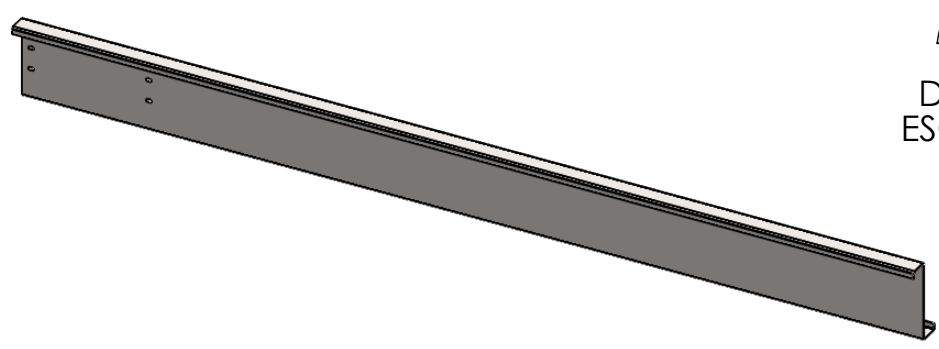
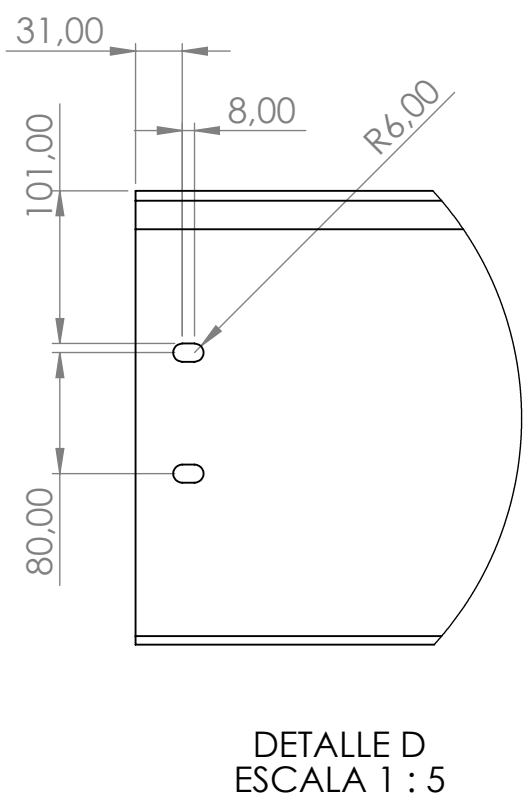
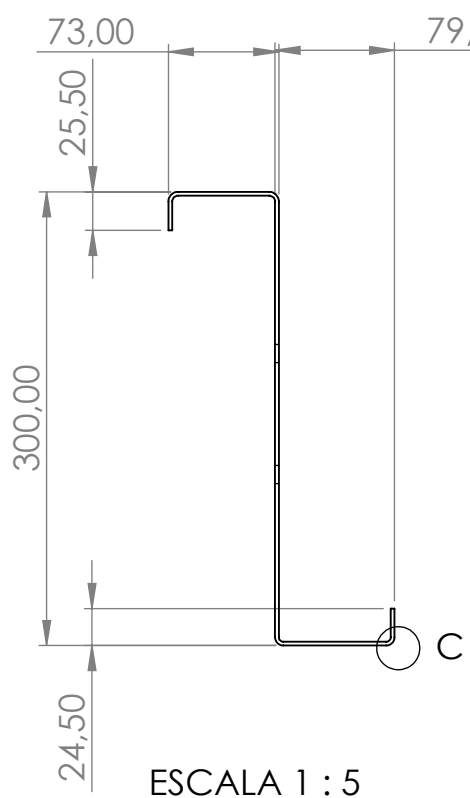
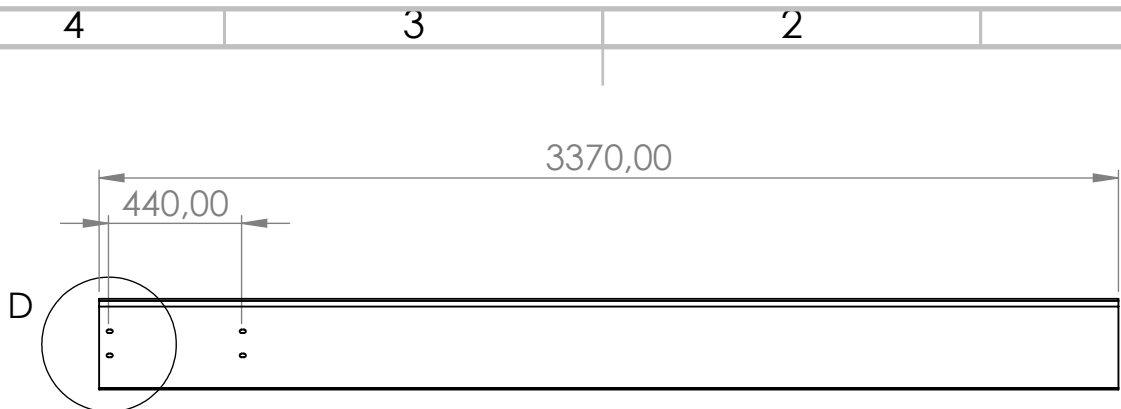
A	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO DEL PROYECTO:	A
	DIBUJADO:	Pablo Rama	03/09/2020	<i>Estudio numérico de la unión de casquillo para correas esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en frío.</i>	
	REVISADO:				
A	N.º DE DIBUJO	Dibujo 12		TÍTULO DEL PLANO:	A
	UDC			Casquillo J11 Z300t2.5 (DC)	
	Cotas en mm	A4	ESCALA:1:5	HOJA 1 DE 1	



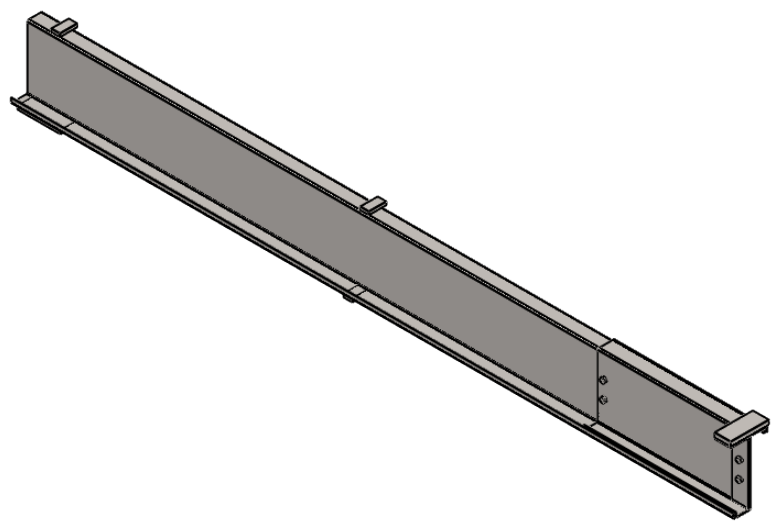
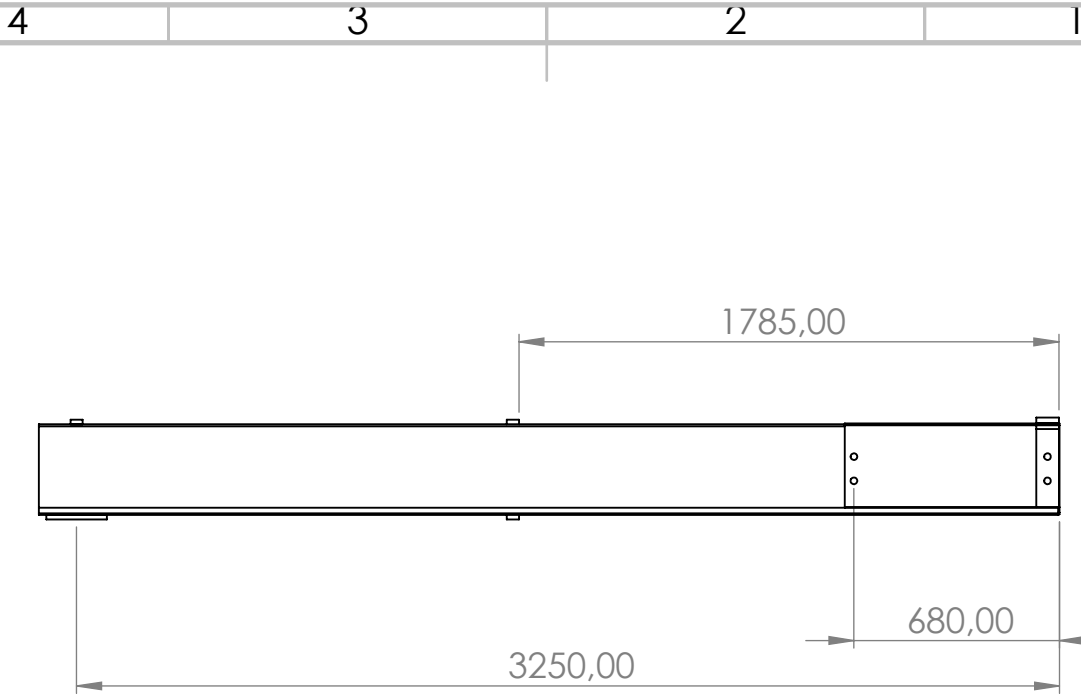
A	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO DEL PROYECTO: <i>Estudio numérico de la unión de casquillo para correas esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en frío.</i>	A
	DIBUJADO:	Pablo Rama	03/09/2020		
	REVISADO:				
UDC	N.º DE DIBUJO Dibujo 13			TÍTULO DEL PLANO: Modelo J16	
	Cotas en mm		A4	ESCALA:1:25	HOJA 1 DE 1



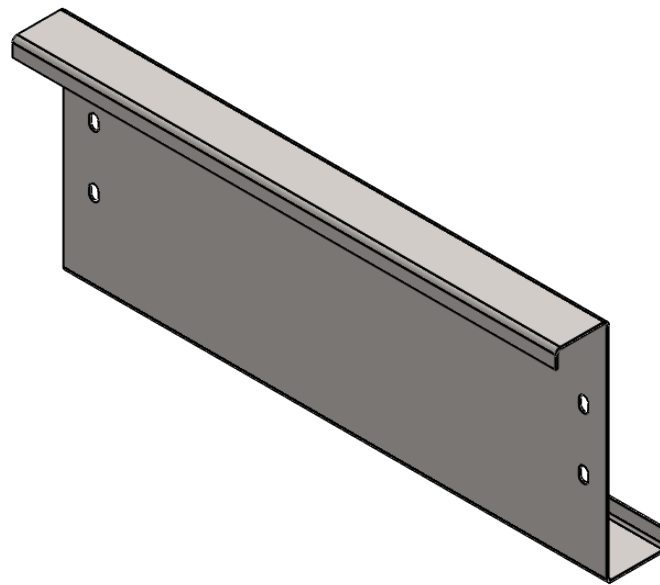
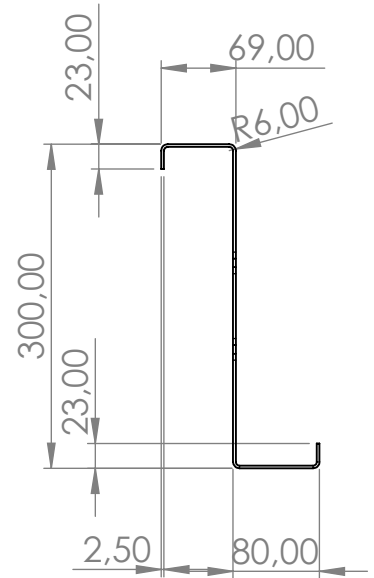
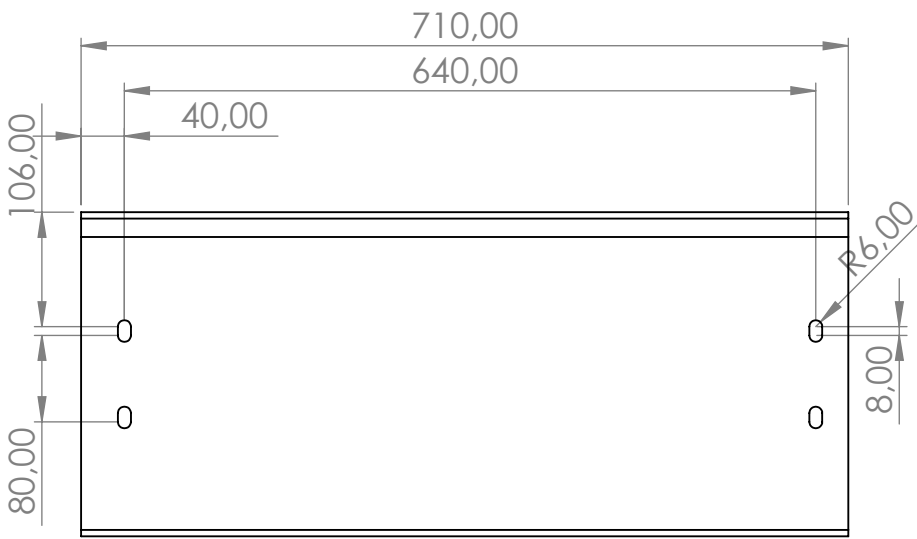
A	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO DEL PROYECTO:	A
	DIBUJADO:	Pablo Rama	03/09/2020	<i>Estudio numérico de la unión de casquillo para correas esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en frío.</i>	
	REVISADO:				
A	N.º DE DIBUJO	Dibujo 14		TÍTULO DEL PLANO:	A
	UDC			Casquillo J16 Z300t2.5	
	Cotas en mm	A4	ESCALA:1:5	HOJA 1 DE 1	



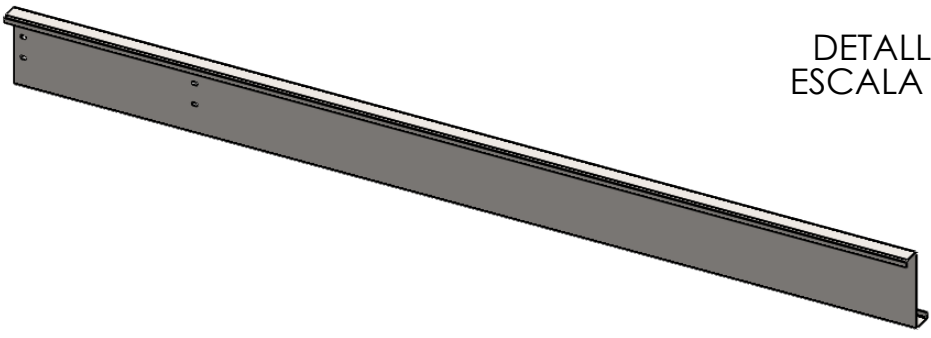
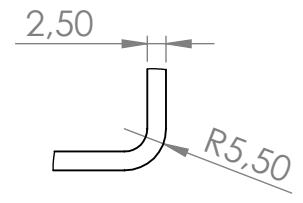
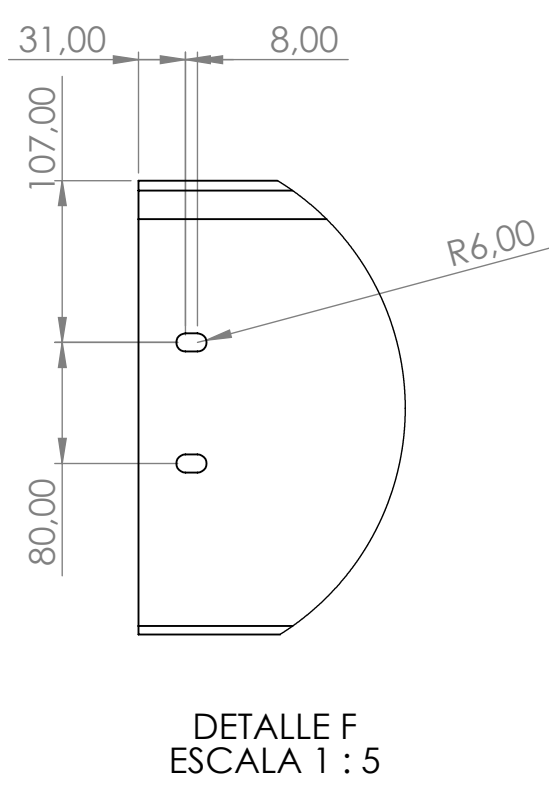
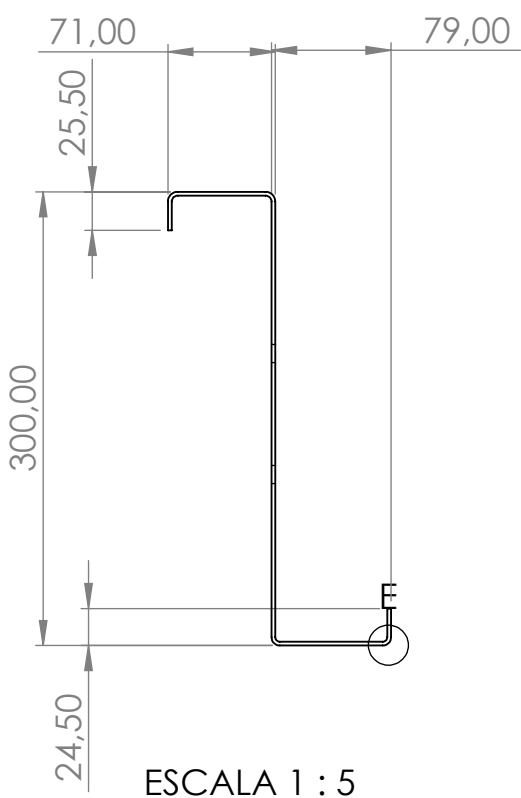
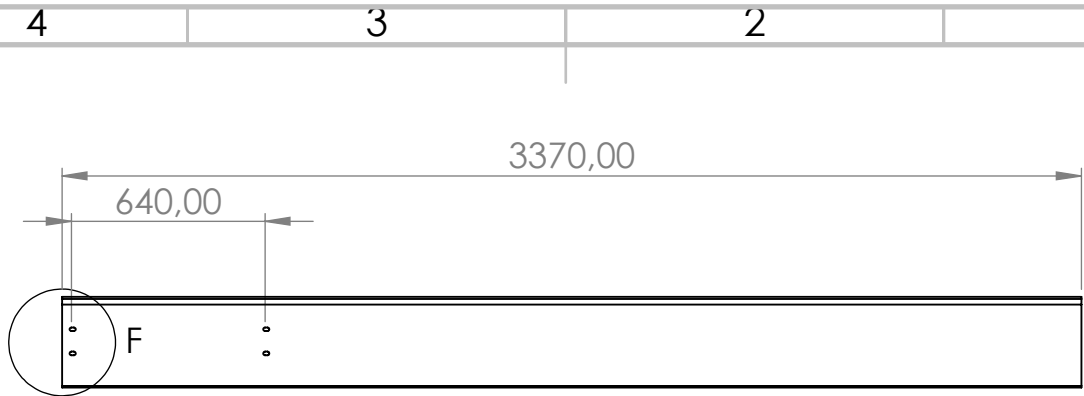
A	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO DEL PROYECTO:	A
	DIBUJADO:	Pablo Rama	03/09/2020	<i>Estudio numérico de la unión de casquillo para correas esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en frío.</i>	
A	REVISADO:			TÍTULO DEL PLANO:	A
	UDC	Dibujo 15		Correa J16 perfil Z300t2.5	
	Cotas en mm	A4	ESCALA:1:25	HOJA 1 DE 1	



A	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO DEL PROYECTO: <i>Estudio numérico de la unión de casquillo para correas esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en frío.</i>	A
	DIBUJADO:	Pablo Rama	03/09/2020		
	REVISADO:				
UDC	N.º DE DIBUJO Dibujo 16		TÍTULO DEL PLANO: Modelo J17		
	Cotas en mm		A4	ESCALA:1:25	HOJA 1 DE 1



	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO DEL PROYECTO:
DIBUJADO:	Pablo Rama		03/09/2020	<i>Estudio numérico de la unión de casquillo para correas esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en frío.</i>
REVISADO:				
A	N.º DE DIBUJO	Dibujo 17		TÍTULO DEL PLANO:
				Casquillo J17 Z300t2.5
	Cotas en mm	A4	ESCALA:1:7	HOJA 1 DE 1

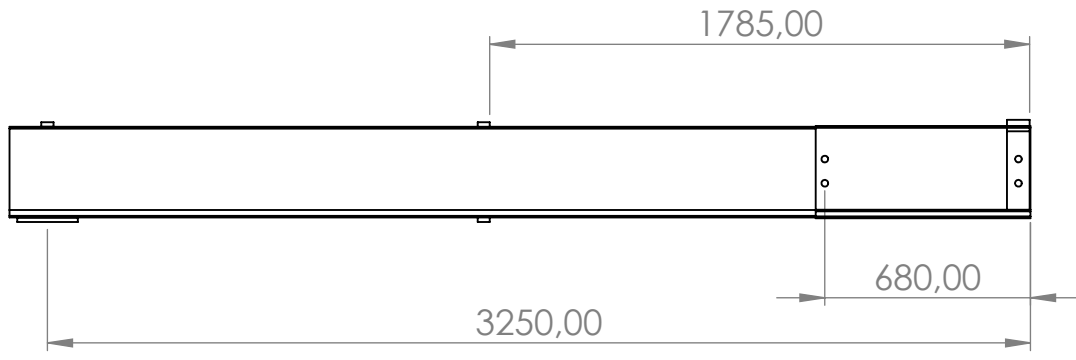


A	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO DEL PROYECTO: <i>Estudio numérico de la unión de casquillo para correas esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en frío.</i>	A
	DIBUJADO: Pablo Rama		03/09/2020		
	REVISADO:				
UDC	N.º DE DIBUJO		TÍTULO DEL PLANO: Correa J17 perfil Z300t2.5		
	Cotas en mm		A4	ESCALA:1:25	HOJA 1 DE 1

4 3 2 1

F

F

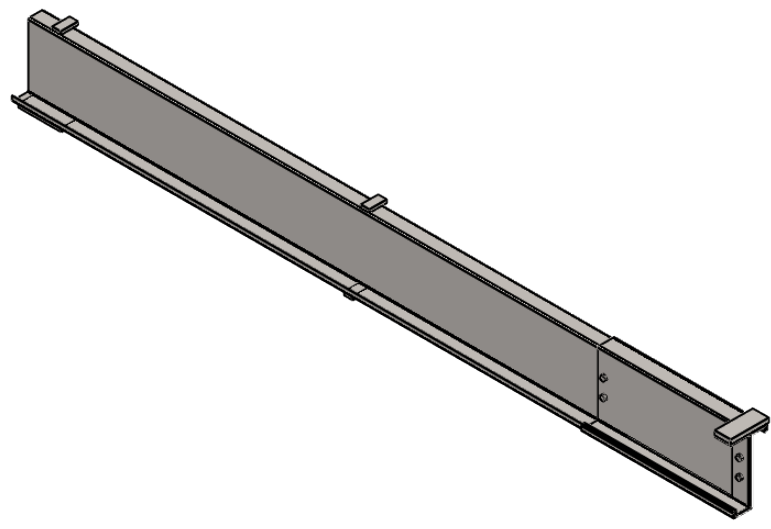


E

E

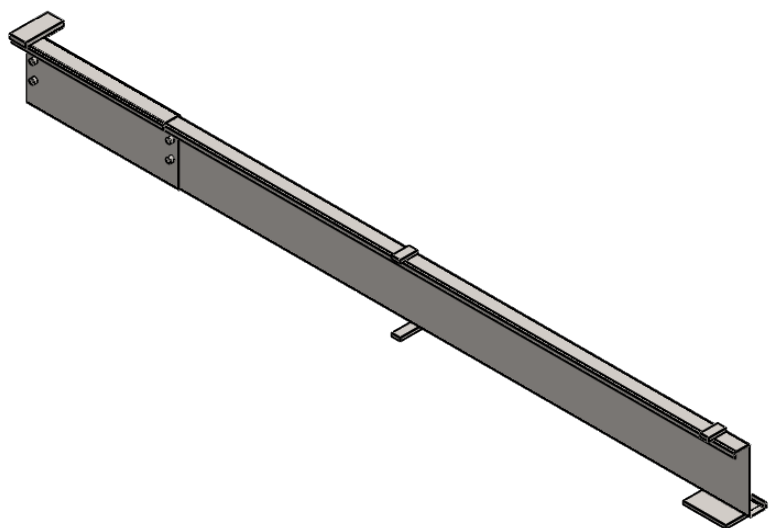
D

D



C

C



B

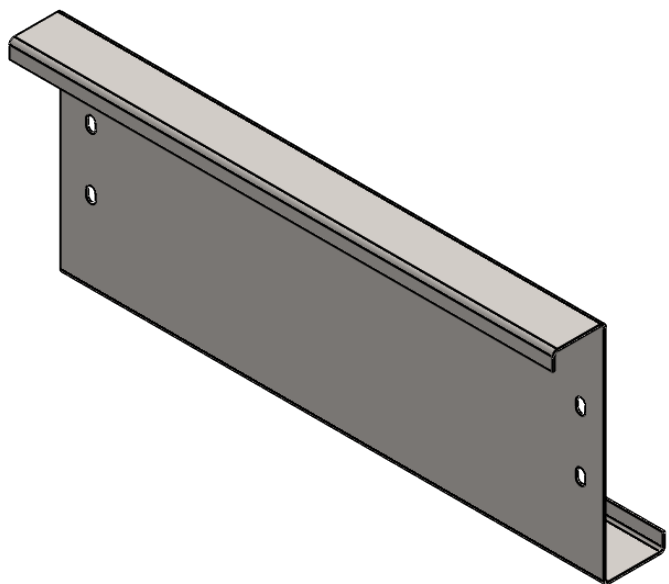
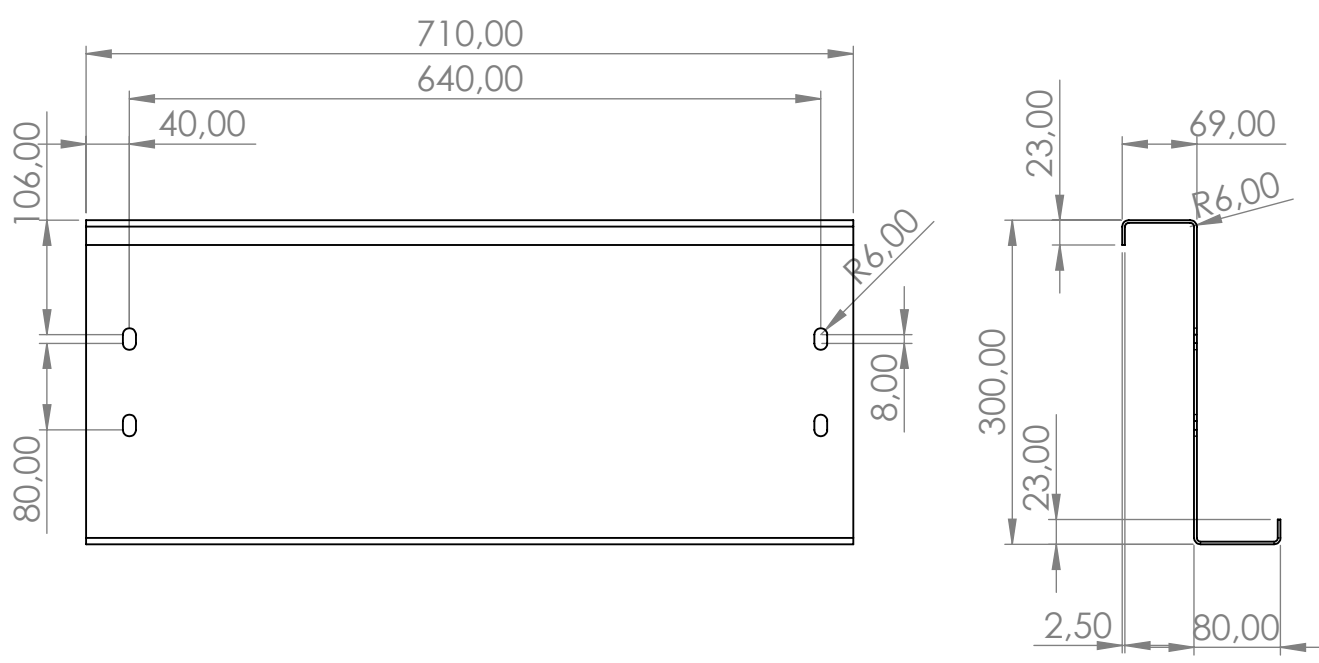
B

A

A

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO DEL PROYECTO:
DIBUJADO:	Pablo Rama		03/09/2020	<i>Estudio numérico de la unión de casquillo para correas esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en frío.</i>
REVISADO:				
UDC	N.º DE DIBUJO	Dibujo 19		TÍTULO DEL PLANO:
				Modelo J17 Doble Casquillo (DC)
	Cotas en mm	A4	ESCALA:1:25	HOJA 1 DE 1

4 3 2 1



A	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO DEL PROYECTO:	A
	DIBUJADO:	Pablo Rama	03/09/2020	<i>Estudio numérico de la unión de casquillo para correas esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en frío.</i>	
	REVISADO:				
A	N.º DE DIBUJO	Dibujo 20		TÍTULO DEL PLANO:	A
	UDC			Casquillo J17 Z300t2.5 (DC)	
	Cotas en mm	A4	ESCALA:1:7	HOJA 1 DE 1	

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

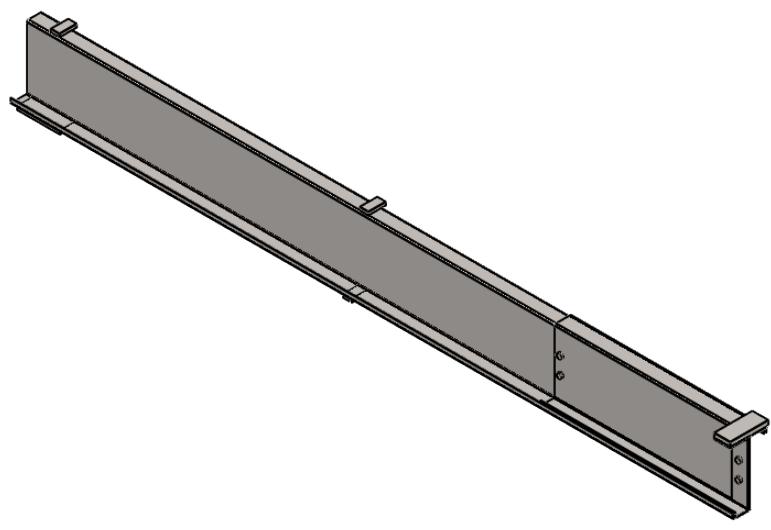
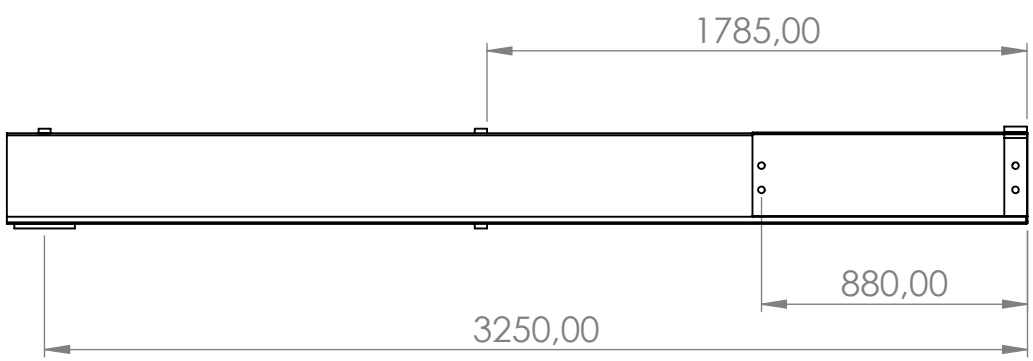
C

B

B

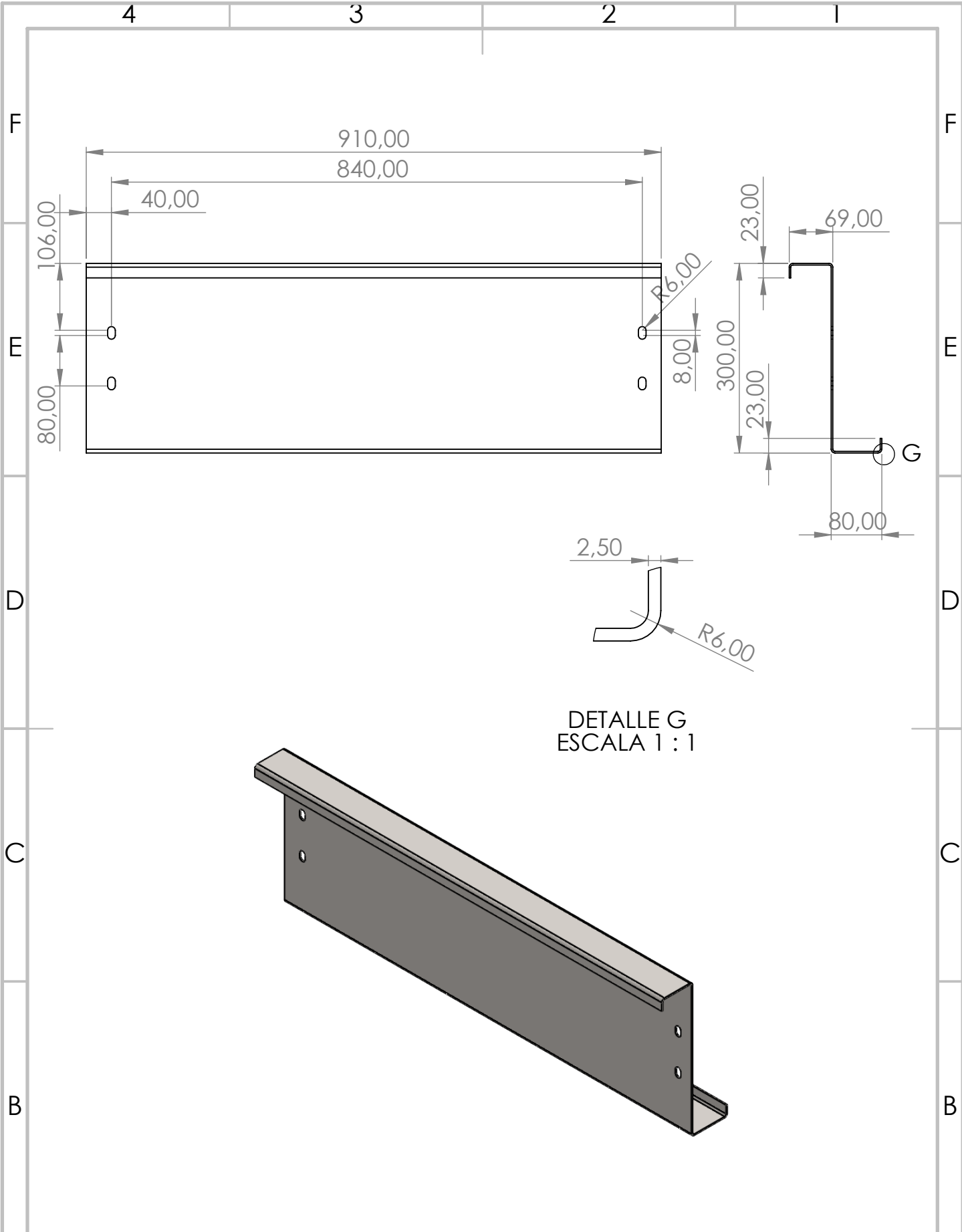
A

A

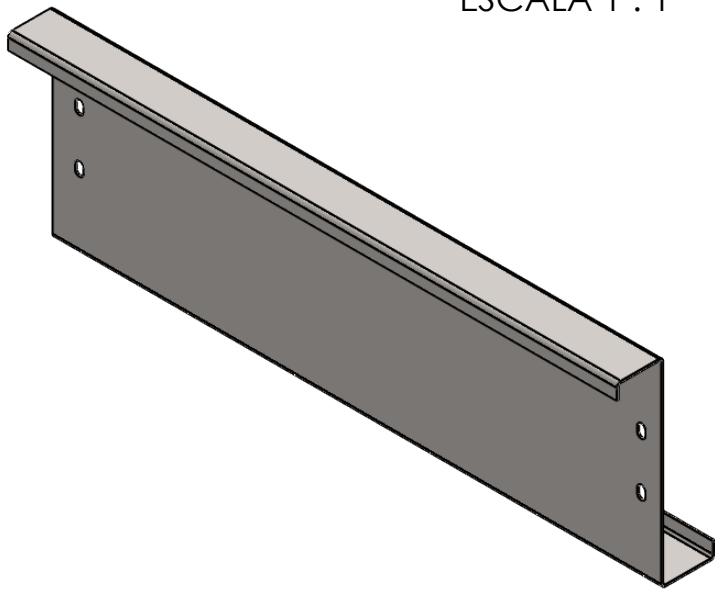


	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO DEL PROYECTO:
DIBUJADO:	Pablo Rama		03/09/2020	<i>Estudio numérico de la unión de casquillo para correas esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en frío.</i>
REVISADO:				
UDC	N.º DE DIBUJO	Dibujo 21		TÍTULO DEL PLANO:
				Modelo J18
	Cotas en mm	A4	ESCALA:1:25	HOJA 1 DE 1

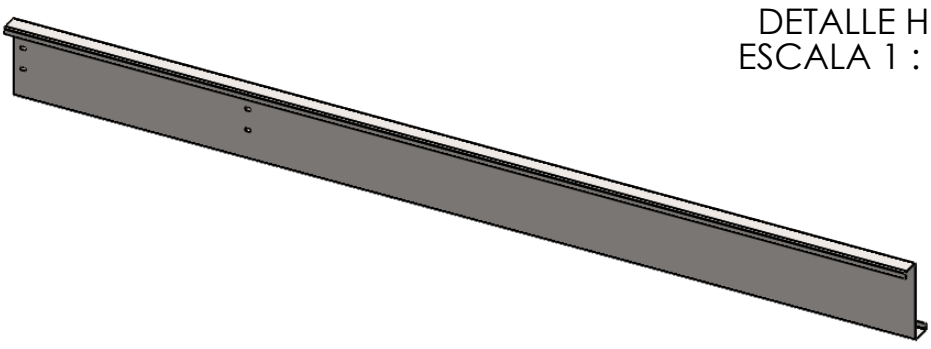
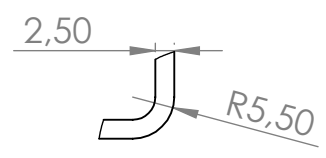
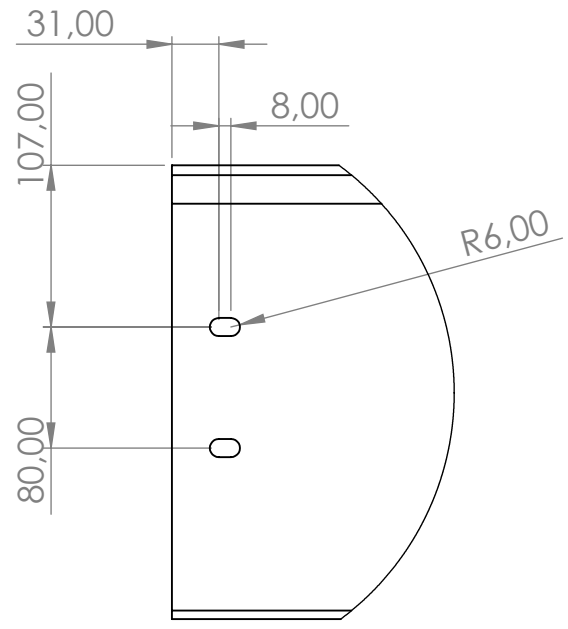
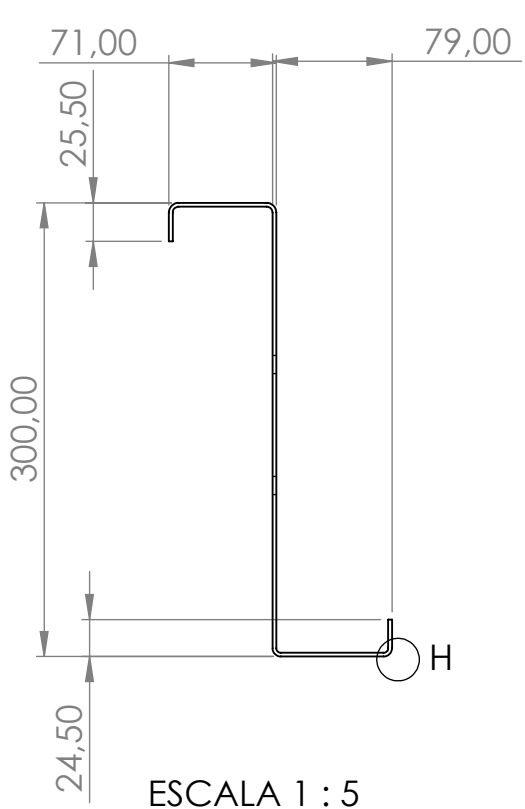
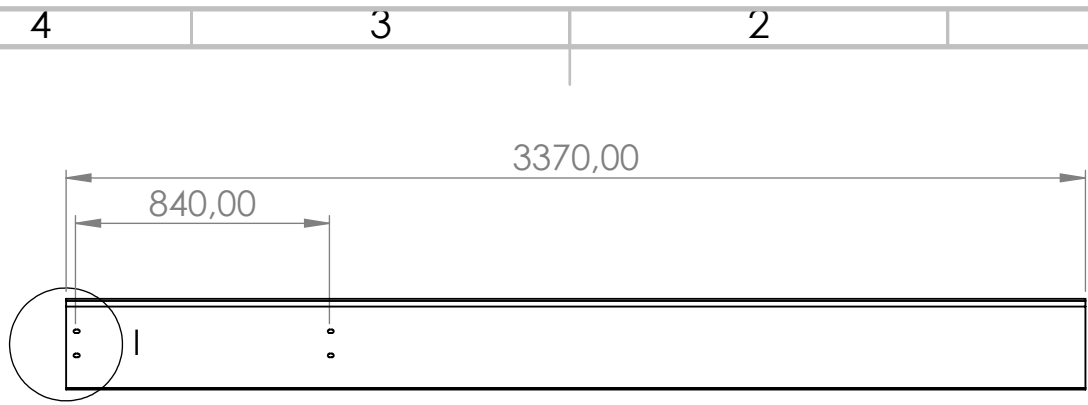
4 3 2 1



DETALLE G
ESCALA 1 : 1



A	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO DEL PROYECTO:	A
	DIBUJADO:	Pablo Rama	03/09/2020	<i>Estudio numérico de la unión de casquillo para correas esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en frío.</i>	
	REVISADO:				
A	N.º DE DIBUJO	Dibujo 22		TÍTULO DEL PLANO:	A
	UDC			Casquillo J18 Z300t2.5	
	Cotas en mm	A4	ESCALA:1:8	HOJA 1 DE 1	

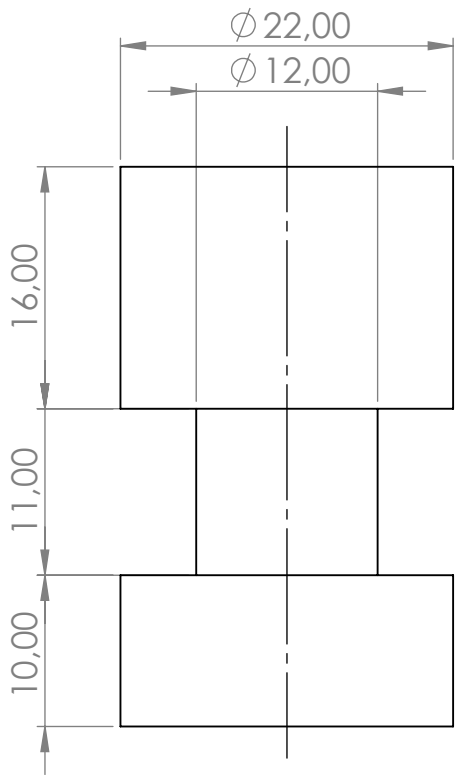


	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO DEL PROYECTO:
DIBUJADO:	Pablo Rama		03/09/2020	<i>Estudio numérico de la unión de casquillo para correas esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en frío.</i>
REVISADO:				
A	N.º DE DIBUJO	Dibujo 23		TÍTULO DEL PLANO:
				Correa J18 perfil Z300t2.5
	Cotas en mm	A4	ESCALA:1:25	HOJA 1 DE 1

4 3 2 1

F

F



E

E

D

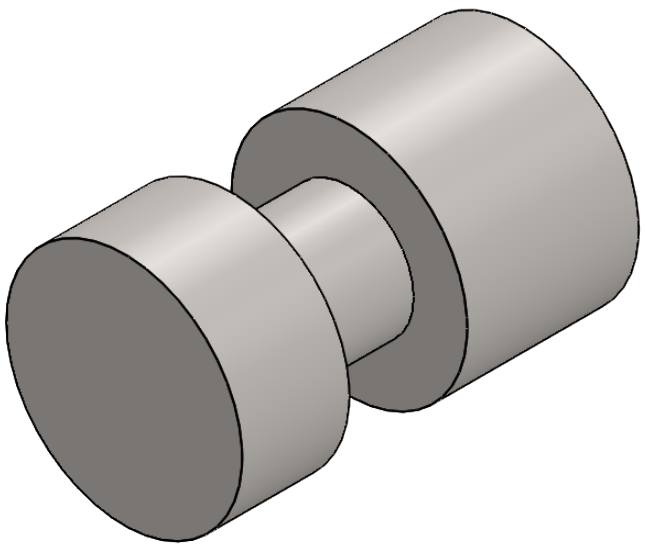
D

C

C

B

B

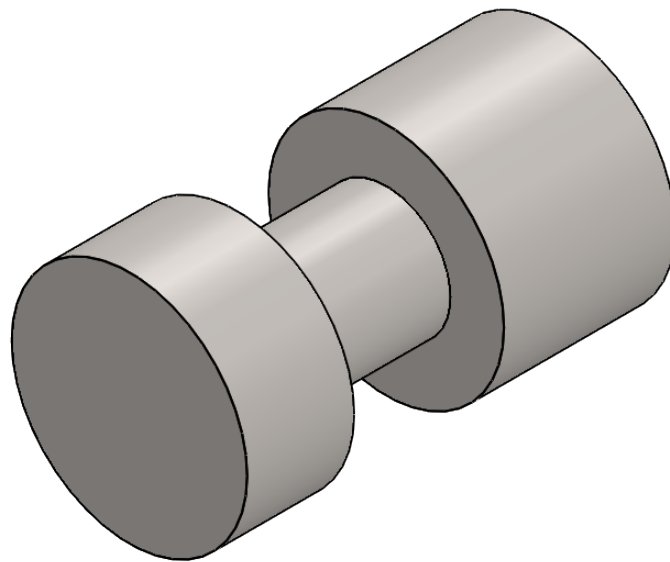
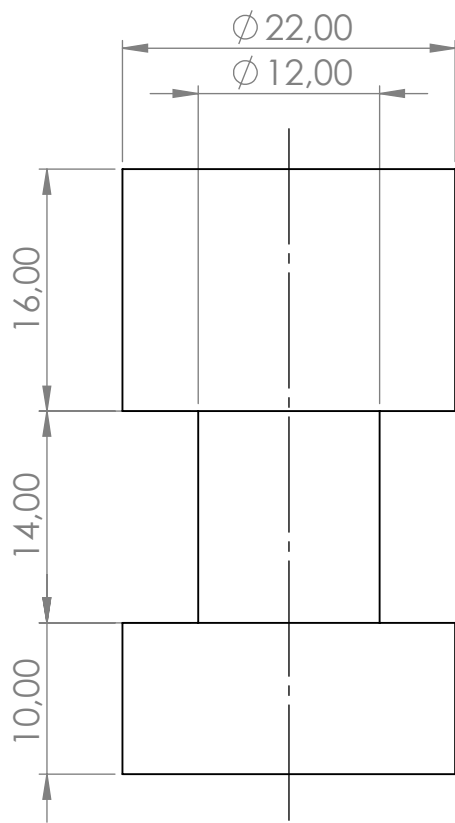


A

A

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO DEL PROYECTO:
DIBUJADO:	Pablo Rama		03/09/2020	<i>Estudio numérico de la unión de casquillo para correas esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en frío.</i>
REVISADO:				
UDC	N.º DE DIBUJO	Dibujo 24		TÍTULO DEL PLANO:
	Cotas en mm	A4		Tornillos S1
			ESCALA:2:1	HOJA 1 DE 1

4 3 2 1

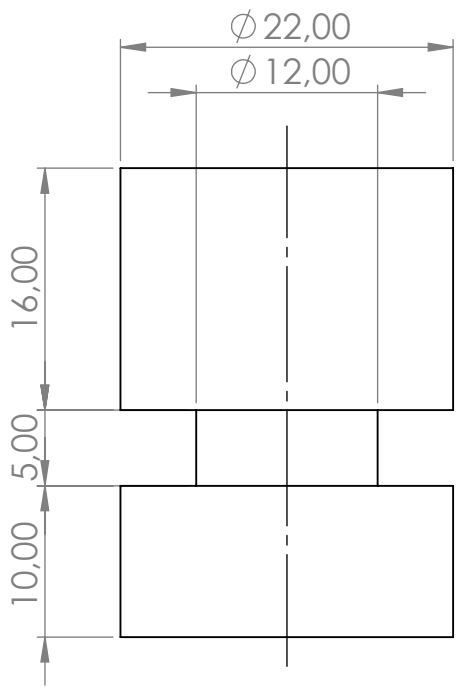


	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO DEL PROYECTO:
DIBUJADO:	Pablo Rama		03/09/2020	<i>Estudio numérico de la unión de casquillo para correas esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en frío.</i>
REVISADO:				
A	N.º DE DIBUJO	Dibujo 25		TÍTULO DEL PLANO:
				Tornillos S1 (DC)
	Cotas en mm	A4	ESCALA:2:1	HOJA 1 DE 1

4 3 2 1

F

F



E

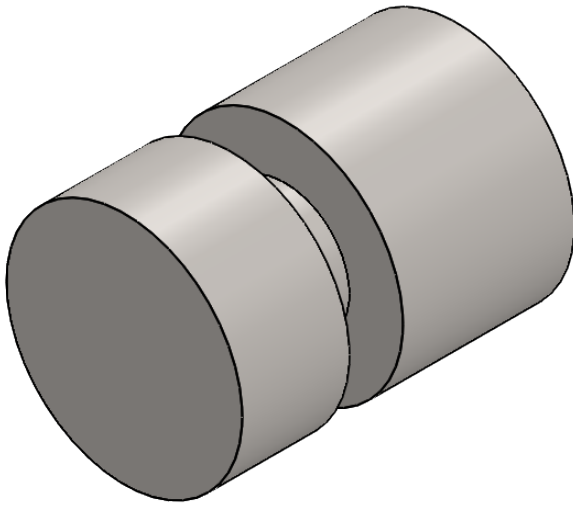
E

D

D

C

C



B

B

A

A

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO DEL PROYECTO:
DIBUJADO:	Pablo Rama		03/09/2020	<i>Estudio numérico de la unión de casquillo para correas esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en frío.</i>
REVISADO:				
UDC	N.º DE DIBUJO			TÍTULO DEL PLANO:
	Dibujo 26			Tornillos S2
	Cotas en mm		A4	ESCALA:2:1
				HOJA 1 DE 1

4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

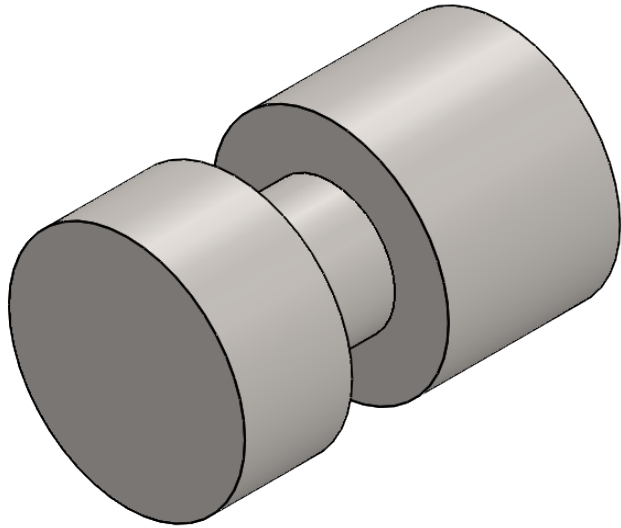
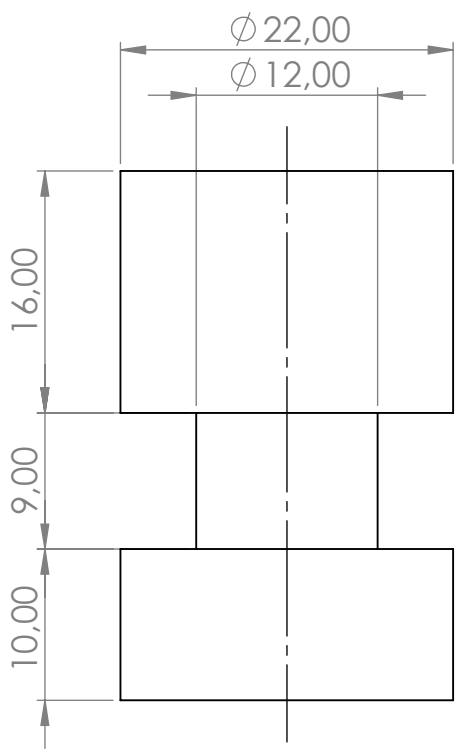
D

C

C

B

B



A

A

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO DEL PROYECTO:
DIBUJADO:	Pablo Rama		03/09/2020	<i>Estudio numérico de la unión de casquillo para correas esbeltas de múltiples vanos en acero conformado en frío.</i>
REVISADO:				
UDC	N.º DE DIBUJO			TÍTULO DEL PLANO:
	Dibujo 27			Tornillos S2 (DC)
	Cotas en mm		A4	ESCALA:2:1
				HOJA 1 DE 1

4 3 2 1