



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

Diseño de Componente Mecánico Integrando  
Resultados del Proceso de Fabricación con  
Materiales Compuestos en el Análisis Mecánico

Autor

José Manuel Sánchez Güil

Directores

Isabel Clavería Ambroj

Manuel Muniesa Burillo

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2016



**DECLARACIÓN DE  
AUTORÍA Y ORIGINALIDAD**

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

D./D<sup>a</sup>. JOSÉ MANUEL SÁNCHEZ GÜIL,

con nº de DNI 73159324-G en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster) Grado \_\_\_\_\_, (Título del Trabajo)

Diseño de Componente Mecánico Integrando Resultados del Proceso de Fabricación con Materiales Compuestos en el Análisis Mecánico

---

---

---

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

Zaragoza, 20 de Septiembre del 2016

Fdo:

# Diseño de Componente Mecánico Integrando Resultados del Proceso de Fabricación con Materiales Compuestos en el Análisis Mecánico

## RESUMEN

El presente trabajo se centra en el diseño mecánico de tres jaulas de alojamiento para rodamientos en que se aplicara una nueva metodología de trabajo y estará encuadrado en el Departamento de Ingeniería Mecánica.

Se realizara un análisis mecánico-estructural mediante un software especializado, de manera que se integren resultados provenientes del proceso de fabricación, en particular, el tensor de orientación de fibra de un material compuesto.

Así pues, se compararan los resultados de desplazamientos y tensiones provenientes de un análisis mecánico tradicional y un análisis mecánico donde se aplica la nueva metodología de trabajo.

Para ello, se utilizaran herramientas de modelado mecánico como SolidWorks, herramientas de diseño mecánico como Abaqus, herramientas de diseño que tienen en cuenta el proceso de fabricación en plástico como Moldflow y herramientas de diseño de materiales como Digimat.

# Tabla de contenidos

1. Alcance y Objetivos.....	6
2. Metodología de análisis.....	8
2.1 Generación de la pieza en SolidWorks.....	8
2.2 Generación del modelo en Abaqus.....	8
2.3 Moldeo por inyección en Moldflow.....	9
2.4 Definición del material.....	10
2.5 Mapeado de las mallas de Abaqus y Moldflow.....	11
2.6 Fase de análisis en Abaqus.....	11
3. Aplicación de la metodología.....	13
3.1 Jaula de alojamiento para rodamientos.....	15
3.2 Jaula de alojamiento para rodamientos con reducción de anchura de los travesaños.....	23
3.3 Ensamblaje entre jaula de alojamiento para rodamientos y un refuerzo en el travesaño.....	31
4. Comparación de resultados.....	39
5. Conclusión.....	41
6. Bibliografía.....	42
Anexo 1: Jaula de rodamientos.....	44
Anexo 2: SolidWorks.....	58
Anexo 3: Moldflow.....	72

Anexo 4: Digimat.....	101
Anexo 5: Abaqus.....	117

## **1. Alcance y objetivos**

El principal objetivo de este proyecto es realizar un análisis mecánico de diferentes opciones de diseño para el componente “Jaula de alojamiento para rodamientos”, aplicando una metodología de trabajo que permite integrar en el análisis mecánico resultados provenientes del análisis del proceso de fabricación del componente.

El TFG se encuentra en el ámbito del moldeo por inyección de plásticos, en concreto en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza.

Tradicionalmente, el análisis completo de un componente se realizaba de manera independiente en cada herramienta CAE, tanto en la herramienta de cálculo mecánico, como en la herramienta CAE relacionada con el proceso de fabricación.

Para abordar el análisis del proceso de fabricación se utilizará la herramienta CAE llamada Moldflow que tomará como entrada una geometría creada en un programa de diseño 3D (SolidWorks), unas propiedades del material que influyen en las diferentes fases del proceso y unas condiciones de proceso tales como presión o temperatura, dándonos información acerca del proceso de fabricación.

En la mayoría de los casos, para solucionar los diferentes problemas los únicos cambios que se realizan son en el diseño de los canales de refrigeración, en los puntos de inyección o en la geometría de la pieza, es decir, en el diseño estructural. No considerando de forma directa otros resultados mecánicos como las tensiones residuales o la orientación del material.

Anteriormente a la nueva metodología que se aplicará en el análisis mecánico, el procedimiento era la realización de un mallado en la herramienta CAE llamada Abaqus imponiendo sus cargas y restricciones únicamente, como no se tenían en cuenta los resultados del proceso de fabricación, como la anisotropía, se aplicaba un coeficiente de seguridad mayor para asegurar la función de la pieza.

Este TFG propone una metodología de análisis, en la que se integrará tanto el proceso de fabricación como las condiciones de carga cuando se trabaja con materiales compuestos, en particular a una jaula de alojamiento para rodamientos fabricada con poliamida 66 y reforzado con 30% de fibra de vidrio. Para ello existe un programa llamado Digimat RP, que atiende a la microestructura del material teniendo en cuenta la orientación de fibra obtenida tras el proceso de fabricación.

Teniendo en cuenta el material particularizado en el análisis mecánico-estructural se podrá observar la tensión de Von Mises y los máximos desplazamientos aplicando la metodología descrita para tres casos y no aplicando dicha metodología, obteniendo las

conclusiones pertinentes. También se compararan los resultados para la jaula con sus tres variantes, para poder observar cual es la que mejor cumple su función.

Fuera de la memoria, se indican unos anexos que son una ampliación de cada capítulo de la memoria, explicando las funciones principales de la pieza a ensayar y cada uno de los programas utilizados, ayudando a entender con mayor claridad los procedimientos llevados a cabo.

## **2. Metodología de análisis**

La metodología cuenta con los siguientes pasos:

- Generación de la pieza mediante modelado mecánico en SolidWorks.
- Importación de la pieza 3D y generación del modelo en Abaqus.
- Moldeo por inyección en Moldflow
- Definición del material seleccionado según caracterización experimental con Moldflow en Digimat RP
- Mapeado de la malla de elementos finitos generada en Abaqus y Moldflow con el archivo de orientación de fibra asociado mediante Digimat RP.
- Análisis en Abaqus con la nueva malla generada con toda la información importada en Digimat RP.

### **2.1 Generación de la pieza en SolidWorks**

El programa SolidWorks se utiliza para generar piezas en 3D mediante modelado mecánico, el cual genera un fichero de extensión .step. Este fichero contiene los documentos relacionados con los diferentes procesos realizados para conformar la geometría de la pieza o el ensamblaje de las mismas.

### **2.2 Generación del modelo en Abaqus**

En esta metodología de cálculo se importa el archivo generado anteriormente en SolidWorks y mediante el programa de simulación Abaqus se genera un modelo mediante el método de elementos finitos que permite el modelado, análisis y visualización de cualquier tipo de geometría, el programa genera un fichero de extensión .inp.

Este fichero incluye toda la información correspondiente a la geometría del modelo, las condiciones de carga y las cargas aplicadas sobre la pieza, así como el mallado realizado sobre la pieza, que de forma convencional se trata como un material isótropo.

## 2.3 Moldeo por inyección en Moldflow

Se genera mediante un proceso de moldeo por inyección en Moldflow, el cual genera un fichero de extensión .pat. Este fichero incluye los datos correspondientes a la geometría de la pieza con sus canales de refrigeración generado mediante el método de elementos finitos, el material escogido en la biblioteca de materiales y las condiciones de proceso resumidas en la tabla 1 en función del tipo de fase del proceso.

Fase	Parámetros
Fase de dosificación	Volumen a inyectar
Fase de llenado	Tiempo de inyección Velocidad de inyección Presión límite
Fase de compactación	Presión de mantenimiento Tiempo de compactación
Fase de solidificación	Tiempo de enfriamiento Temperatura del molde

Tabla 1

Dichas fases proporcionan unos resultados que son importantes tener en cuenta cuando se realiza el proceso de fabricación mediante moldeo por inyección:

- **Tiempo de llenado:** tiempo que le cuesta a la pieza llenarse de manera completa. A nivel básico nos da información de si la pieza se llena completamente y del camino que sigue el flujo en ese llenado.
- **Presión de inyección:** presión necesaria para que el molde se llene en condiciones de temperatura y caudal indicados. La presión de inyección está relacionada con la velocidad resumiéndose en que cuanta mayor velocidad, mayor presión de inyección para poder superar la resistencia generada en la entrada a la cavidad.
- **Temperatura en el frente de flujo:** temperatura alcanzada durante el tiempo de inyección. No debería alejarse mucho de la temperatura de inyección impuesta, siendo esta de 290 °C.
- **Líneas de soldadura:** puntos débiles creados cuando dos flujos de material convergen.
- **Atrapamientos de aire:** compresión de una burbuja de aire al converger dos flujos de masa fundida.

- **Deformaciones:** contracción diferencial no uniforme en la geometría al enfriarse.
- **Fuerza de cierre:** fuerza máxima para mantener el molde cerrado durante el llenado.
- **Contracción volumétrica:** factibilidad que tiene una pieza a ser compactada.
- **Orientación del tensor de fibra:** grado de orientación de fibras al final del proceso de moldeado.

Cada uno de estos resultados se almacena en diferentes archivos, una vez que se crea la malla con sus condiciones de proceso. El principal resultado objetivo del estudio es el resultado de orientación de fibra, ya que influye en el estudio de la anisotropía del material, este resultado será volcado junto al fichero de extensión .pat correspondiente al proceso de moldeo por inyección. El fichero de extensión de la orientación del tensor de fibra es .xml.

## 2.4 Definición del material

El programa Digimat RP permite definir con precisión el comportamiento de materiales compuestos y facilita el proceso desde el análisis estructural FEA, el diseño del material y el proceso de fabricación, ayudando a la obtención de productos innovadores y eficaces reduciendo el coste asociado a la generación y ensayo de prototipos.

En los materiales compuestos de Digimat RP, formados por una matriz de un material plástico y una fibra, se permite la incorporación de resultados experimentales obtenidos mediante otros programas de simulación. Esta herramienta, por tanto, analiza el rendimiento de la fibra que refuerza los plásticos y cierra la distancia entre el proceso de moldeo por inyección y el comportamiento estructural del material.

Los plásticos compuestos reforzados con fibras analizados en Digimat RP se caracterizan porque son anisótropos, en lugar de isótropos como en los otros programas de simulación. La base de datos de estos programas de simulación ofrece materiales estándar donde no se recoge los efectos de la orientación de fibra.

En su defecto, Digimat RP selecciona un material de referencia de su base de datos y sobre él se vuelcan los datos experimentales procedentes del proceso de fabricación y el resultado de orientación de fibra, para tener en cuenta aspectos tan influyentes en las deformaciones como la anisotropía, el comportamiento térmico o la viscoelasticidad de un material. El material se archiva con una extensión .mat.

En nuestro caso, los análisis se van a realizar con un polímero llamado poliamida 66 con 30 % de fibra de vidrio, cuyo módulo elástico es 11300 MPa y tensión de rotura 180 MPa.

## 2.5 Mapeado de las mallas de Abaqus y Moldflow

En esta fase se trata de transferir a la malla de Abaqus, la información acerca de las características del material contenidas en la malla generada en Moldflow, siendo esta información correspondiente a la orientación de fibra en cada elemento de la malla (mediante una referencia al fichero de extensión .xml) y el material de referencia escogido en la base de datos (mediante una referencia al fichero de extensión .mat).

Para la transferencia de esta información es necesario que la posición y orientación de ambas mallas sean iguales, Digimat RP se encarga de la transferencia de información de la malla de Moldflow a la malla de Abaqus generando un fichero de extensión .dof.

## 2.5 Fase de análisis en Abaqus

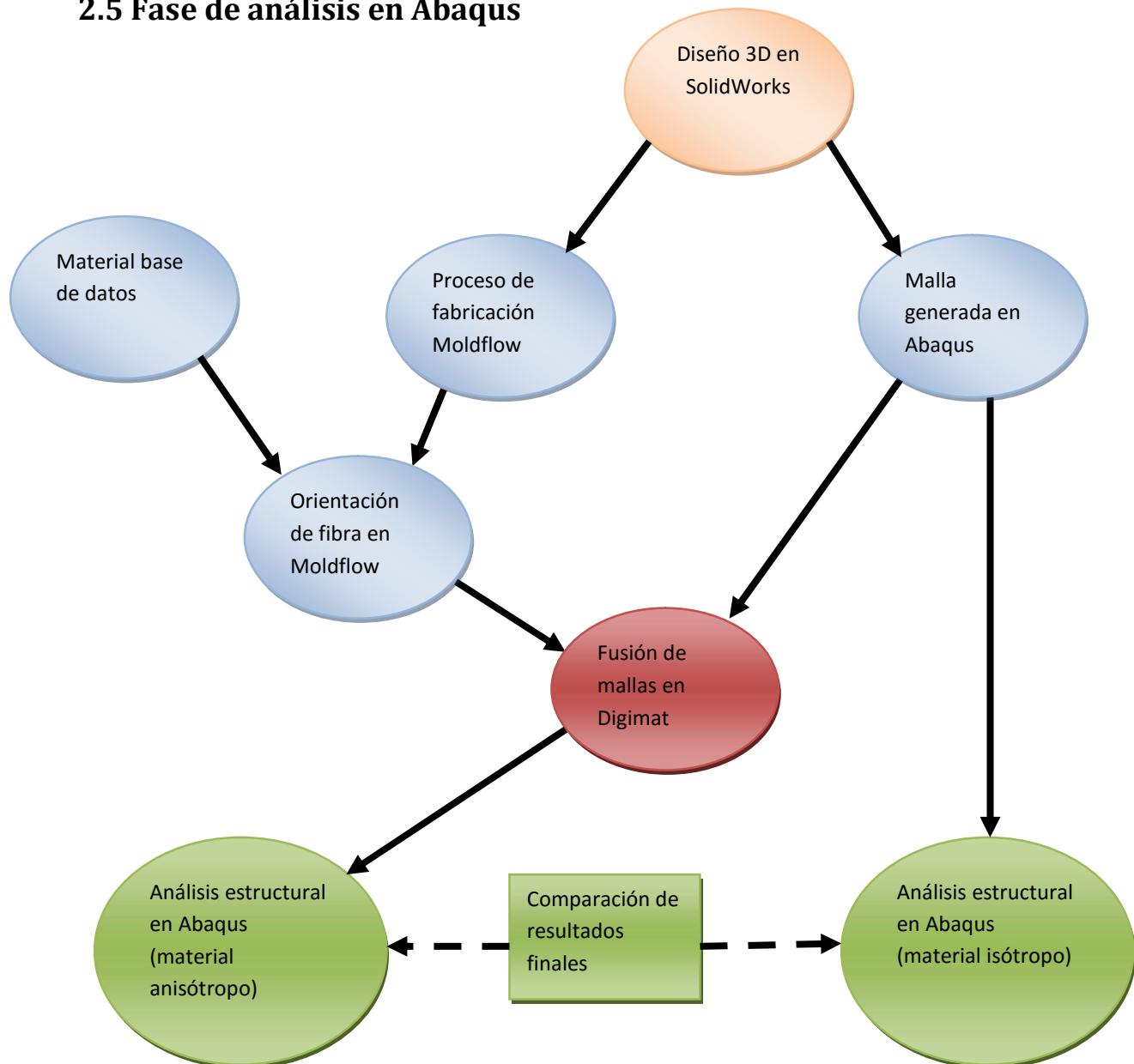


Figura 1

Finalmente se procede a la realización del análisis integrando en el fichero de extensión .inp de Abaqus la información acerca del material incluyendo las características de anisotropía (fichero .mat) y la información relativa al tensor de orientación de la fibra en cada elemento de la malla (fichero .dof).

Con ambos ficheros ya se puede proceder a los análisis mecánico-estructurales y a la visualización de los resultados incluidos en el programa Abaqus.

### 3. Aplicación de la metodología

Se va a proceder a explicar la metodología descrita anteriormente para 3 casos:

- Caso 1: Jaula de alojamiento para rodamientos

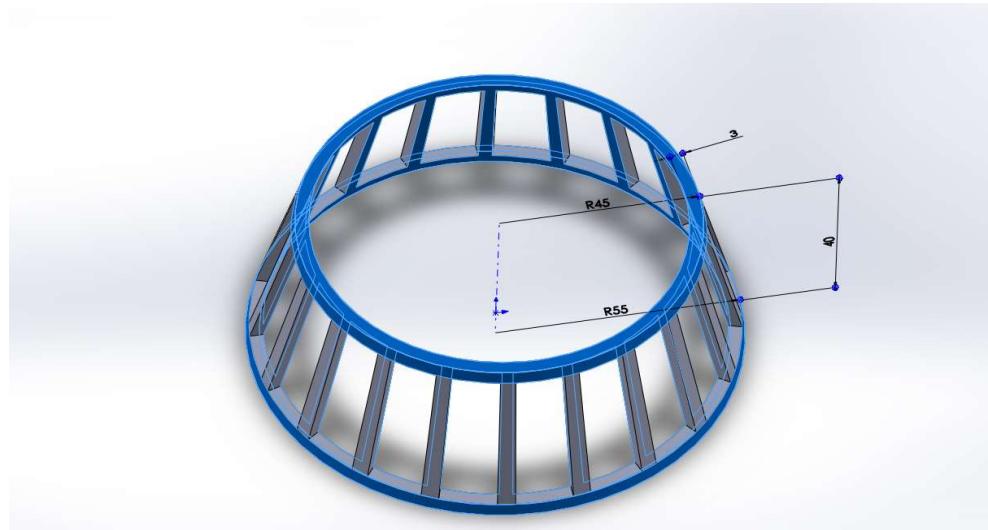


Figura 2

En la figura 2, las medidas más importantes son el radio externo del anillo superior (45 mm), el radio externo del anillo inferior (55 mm), el espesor de la pieza (3 mm), la altura total de la pieza (40 mm) y como se ve en la figura 5, la altura del travesaño (35mm) y la anchura de los travesaños que va aumentando desde 3.4 mm a 4 mm desde la parte superior a la inferior.

- Caso 2: Jaula de alojamiento para rodamientos con reducción de anchura de los travesaños

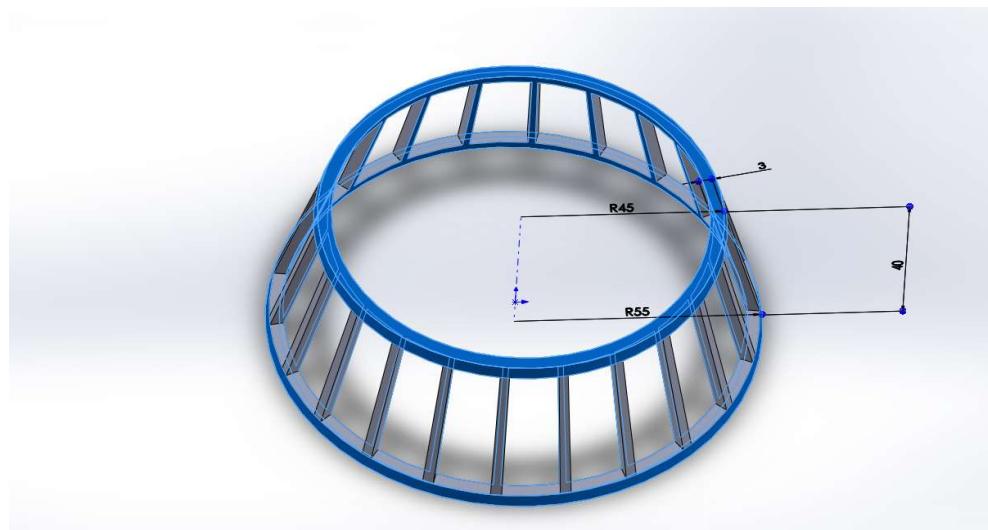


Figura 3

Al igual que antes, en la figura 3, las medidas más importantes son el radio externo del anillo superior (45 mm), el radio externo del anillo inferior (55 mm), el espesor de la pieza (3 mm), la altura total de la pieza (40 mm), la altura del travesaño (35mm) y cambiando únicamente, la anchura de los travesaños que va aumentando desde 2.1 mm a 2.5 mm desde la parte superior a la inferior como se verá en la figura 20.

- **Caso 3: Ensamblaje entre jaula de alojamiento para rodamientos y un refuerzo en el travesaño**

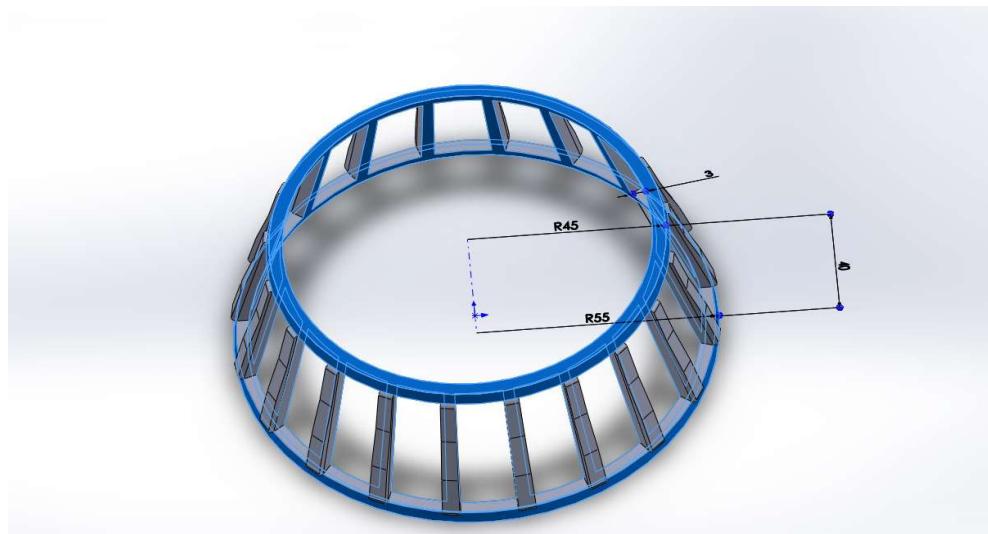


Figura 4

Al igual que en los dos casos anteriores, en la figura 4, las medidas más importantes son el radio externo del anillo superior (45 mm), el radio externo del anillo inferior (55 mm), el espesor de la pieza (3 mm), la altura total de la pieza (40 mm), la altura del travesaño (35mm) y la anchura de los travesaños que va aumentando desde 3.4 mm a 4 mm desde la parte superior a la inferior, siendo iguales que el primer caso estudiado.

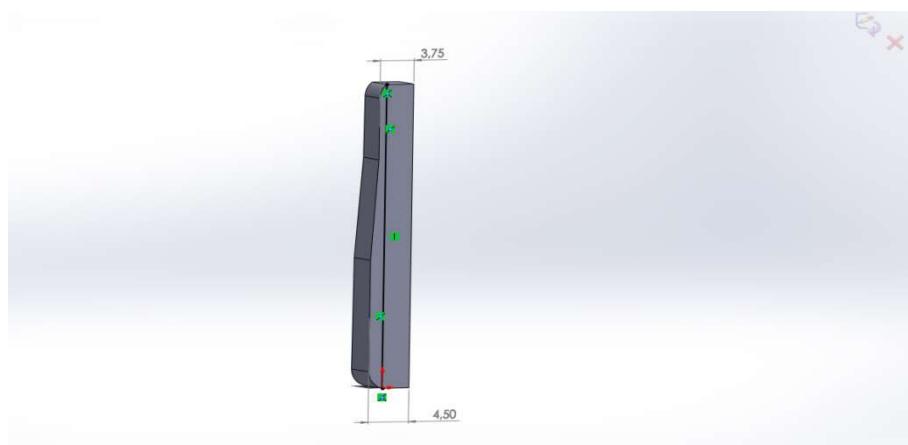


Figura 5

La única diferencia está en el refuerzo impuesto sobre cada travesaño con un espesor máximo de 1.5 mm en la parte inferior y de 0.75 mm en la parte superior (Figura 5).

### 3.1 Jaula de alojamiento para rodamientos

- **La primera fase:** es la realización de la pieza mediante modelado mecánico a través de SolidWorks, dando lugar a un fichero de extensión “jaula.step”.

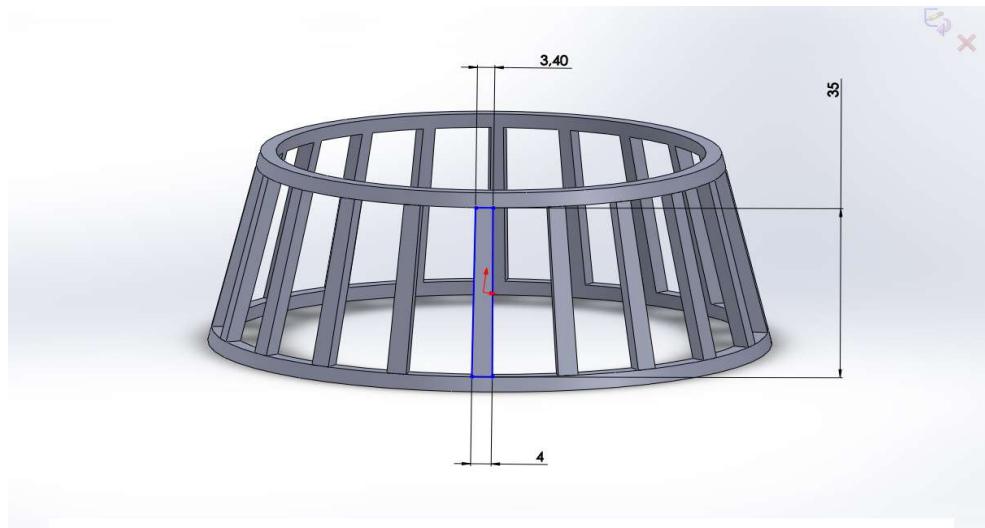


Figura 6

- **En la segunda fase:** se procede con Abaqus a realizar el análisis mecánico, para ello se pondrán como restricciones un empotramiento en el anillo inferior de la jaula y una carga en la cara interna de la jaula de un valor de 3 MPa (Figura 7).

Luego se procede a la generación de un modelo en Abaqus de la pieza (Figura 8), donde la malla de elementos finitos generada tiene 2502 elementos que dará lugar a un fichero de extensión “jaula.inp”. Este sería el único paso a realizar en el caso de que se realizara un análisis mecánico convencional donde no se tendría en cuenta el proceso de fabricación de la pieza.

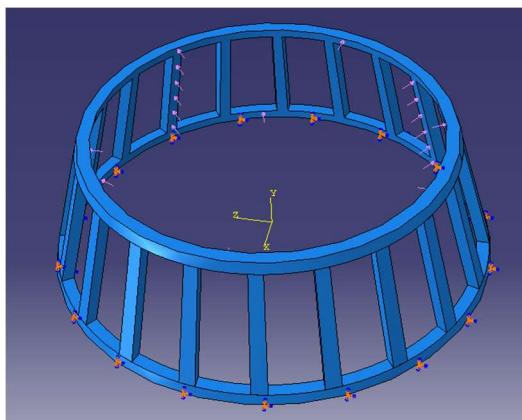


Figura 7

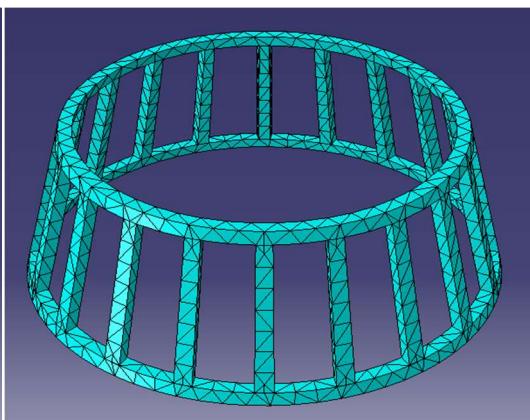


Figura 8

- **La tercera fase:** consiste en realizar el análisis reológico del proceso de fabricación mediante Moldflow, para ello se realizara una nueva malla sobre la pieza en dicho programa y se deberá definir la geometría de la pieza con sus canales de alimentación, los datos del material escogidos en la biblioteca (Ultramid A3WG6 – poliamida con 30% de fibra de vidrio) y las condiciones del proceso de inyección (Tabla 2).

Parámetros	Valor numérico
Tiempo de inyección	1.5 segundos
Temperatura de inyección	290 °C
Porcentaje de llenado en el cambio de fase	99 %
Temperatura del molde	85 °C
Presión de compactación	60 MPa
Tiempo de compactación	10 segundos
Tiempo de enfriamiento	20 segundos

Tabla 2

La malla de elementos finitos generada en Moldflow tiene 184863 elementos y dará lugar a un fichero de extensión “jaula.pat”. Tras el análisis reológico es necesario observar diversos resultados que darán validación al proceso de inyección. Estos resultados son los siguientes:

- **Tiempo de llenado:** tiempo que le cuesta a la pieza llenarse de manera completa, como se puede ver en la figura 9, la pieza se llena completamente en el tiempo establecido pero no de manera similar, ya que el anillo inferior se llena de manera diferente, habiendo zonas que terminan de llenarse a los 0.8 s y otras al 1.5 s.

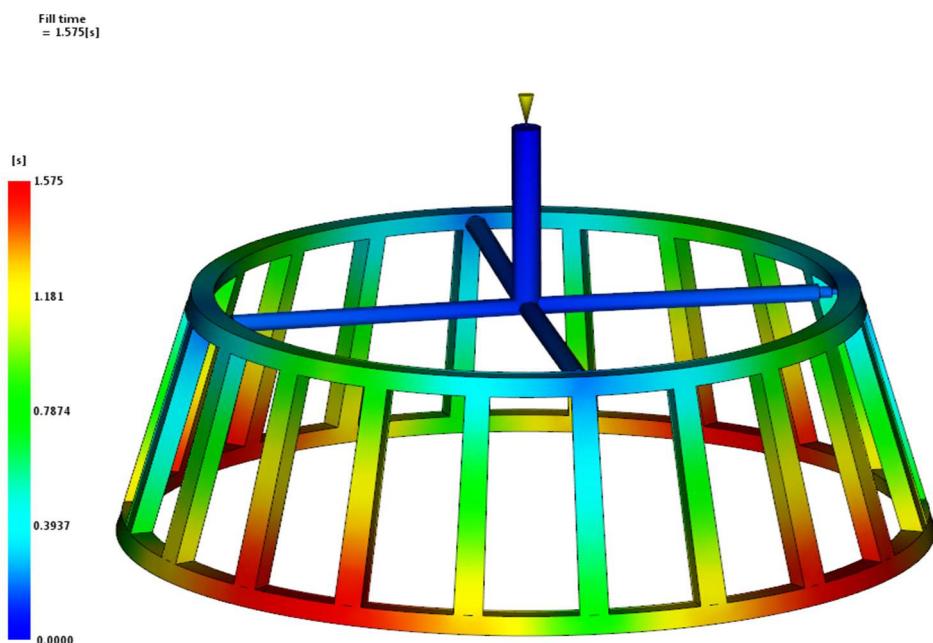


Figura 9

- **Temperatura en el frente de flujo:** temperatura del material durante el tiempo de inyección en la que se admite una variación de 8-10 °C, ya que temperaturas mayores indican que el tiempo de inyección es corto o que se pueden producir defectos superficiales (Figura 10). En el caso particular se observa como en un tiempo de llenado de aproximadamente 1,5 s la variación de temperatura es de unos 4 °C.

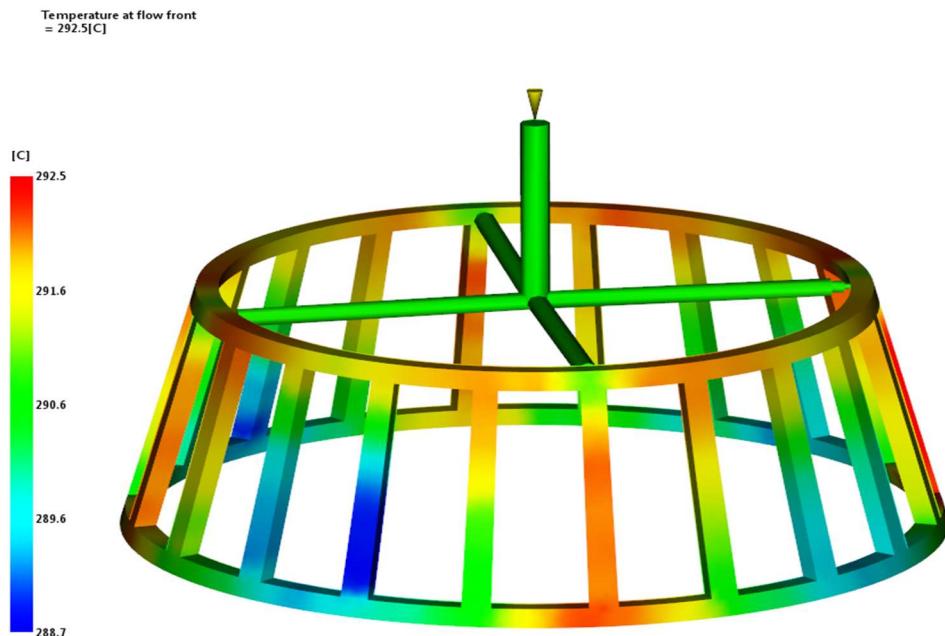


Figura 10

- **Presión de inyección:** presión máxima antes de cambiar a compactación. Se observa como la presión cercana a los puntos de inyección es máxima, en este primer caso es de 28,03 MPa, debido a que es cuando más material tiene que transportar.

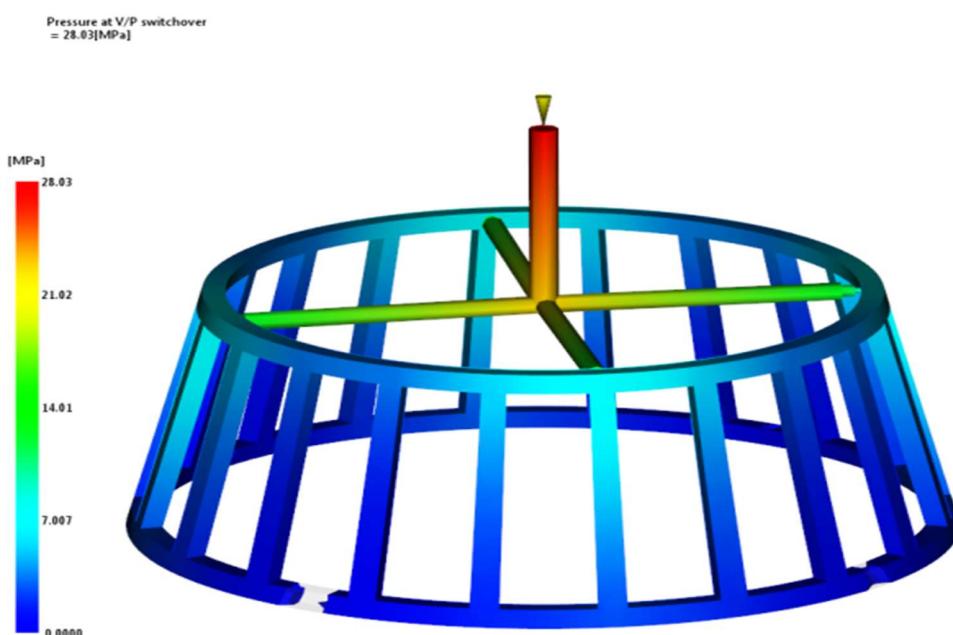


Figura 11

· **Fuerza de cierre:** fuerza máxima para mantener el molde cerrado durante el llenado, siendo para la pieza de 20 Tm el valor máximo y dado en torno a los 2 segundos. Se trata de un valor pequeño acorde con la presión de inyección obtenida y con la geometría de la pieza.

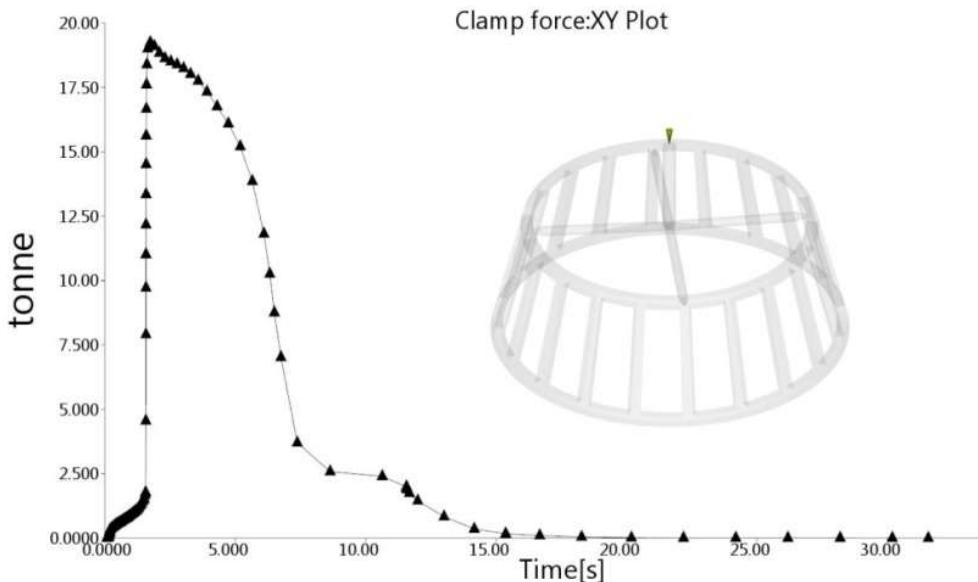


Figura 12

· **Orientación del tensor de fibra:** muestra el grado de orientación de las fibras al final del proceso de moldeado. Se observa como la organización de las fibras, es en la dirección de avance del flujo de plástico, siendo más aleatoria en las zonas donde confluyen varias rutas de flujo de material, en las líneas de soldadura (Figura 13).

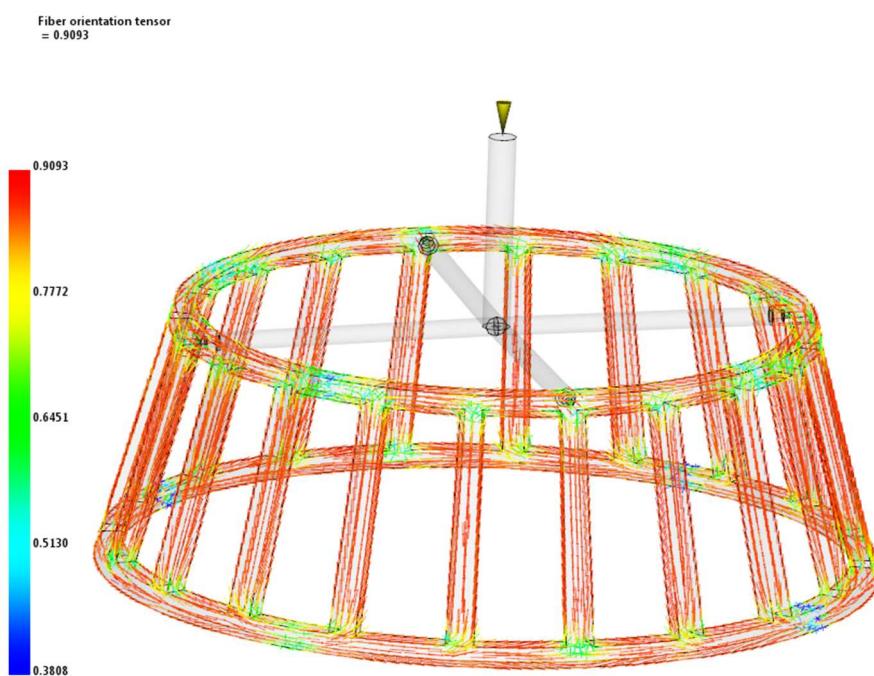


Figura 13

Este último resultado será necesario aplicarlo a la metodología mediante un archivo de extensión “jaula.xml” donde cada elemento de la malla tiene asociado un tensor de orientación de fibra.

- **La cuarta fase:** consistirá en la definición del material compuesto en Digimat RP, para ello se seleccionara un material genérico de la base de datos, para este caso en particular se elegirá un PA66-GF30 (Figura 14 y 15). Sobre este material se aplicara la condición de anisotropía aplicando a cada elemento de la malla el tensor de orientación de fibra.

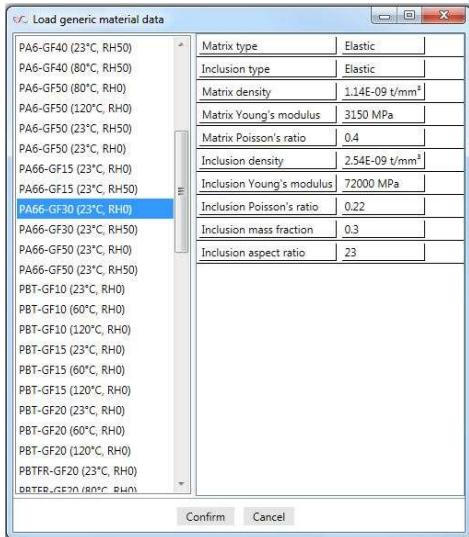


Figura 14



Figura 15

Toda la información relativa al material elegido en la biblioteca de materiales (Figura 14) se almacena en un fichero de extensión “jaula.mat”, mientras que la información relacionada con el tensor de orientación de fibra para cada elemento se almacena en un fichero de extensión “.dof”. Este último fichero será compatible con Abaqus para su posterior lectura de los nuevos resultados.

- **La quinta fase:** se trata de transferir a la malla de Abaqus, la información de las características del material contenidas en la malla de Moldflow, mediante un mapeado de mallas.

El proceso a seguir es cargar el modelo estructural de la jaula mediante el fichero “jaula.inp”, se elige un material genérico de Digimat RP y después se carga el proceso de fabricación a través del fichero “jaula.pat” y el fichero “jaula.xml” que hace referencia al tensor de orientación de fibra para cada elemento. Una vez que se han cargado todos los archivos, Digimat RP realiza un mapeo de ambas mallas (Figura 16) y procesa toda la información dando lugar a un fichero “jaula.inp” que contiene una llamada al fichero del material genérico “jaula.mat” y a su vez una llamada al fichero “.dof” correspondiente al tensor de orientación de fibra para cada elemento.

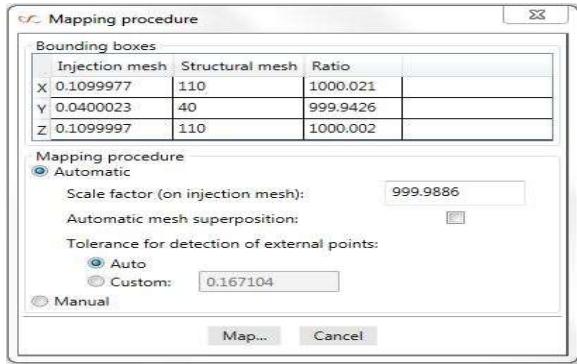


Figura 16

- **La última fase:** es un análisis mecánico-estructural de la pieza generado nuevamente en Abaqus, en el que se podrán ver las principales diferencias entre los dos métodos, uno el que se tiene en cuenta el procesado y la anisotropía del material por medio del tensor de orientación de fibra y el otro método, el que directamente calcula las deformaciones y tensiones sin aplicar la metodología descrita en este apartado.

Los resultados que se van a comparar serán el estado tensional caracterizado en la máxima tensión de Von Mises y el máximo desplazamiento.

### - Desplazamientos (Abaqus)

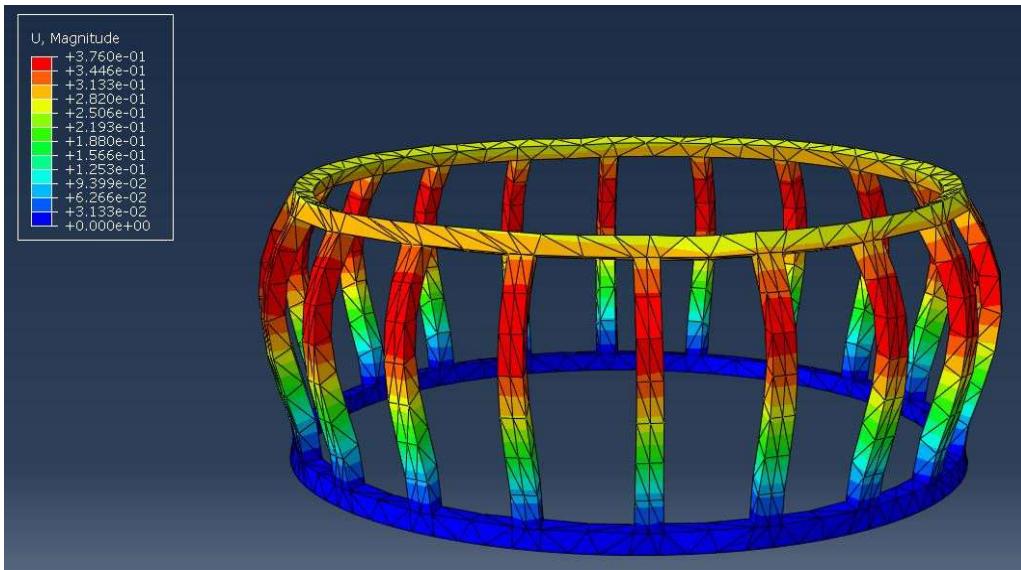


Figura 17

Se puede observar como en la figura 17 los desplazamientos máximos que se pueden dar son del orden de 0.37 mm y se dan en la parte más débil de la jaula, es decir en los travesaños, mientras que en el anillo superior los desplazamientos son inferiores ( $\approx 0.3$  mm).

### - Tensión de Von Mises (Abaqus)

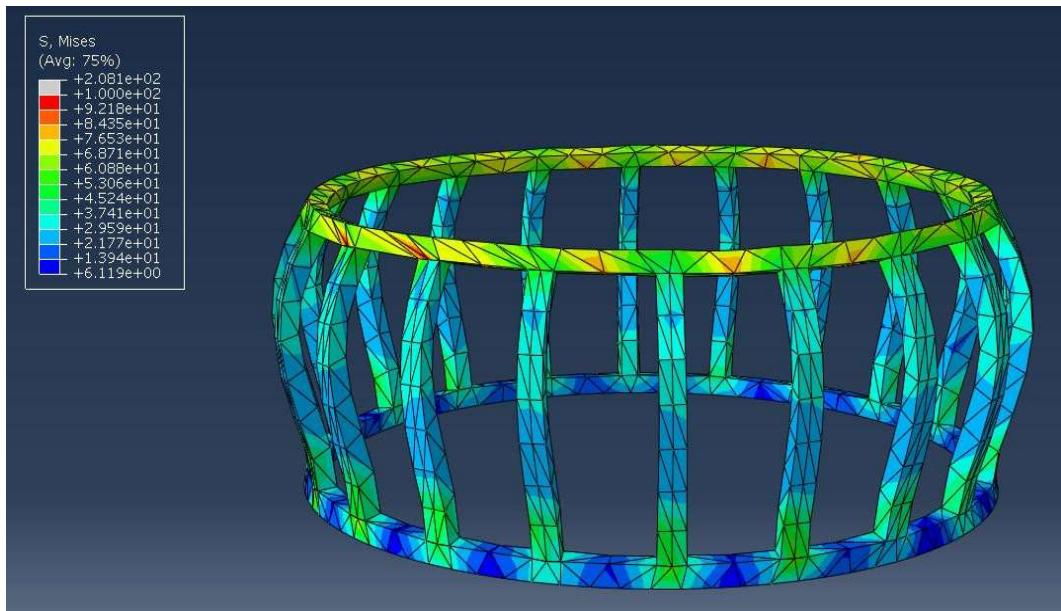


Figura 18

En relación a las tensiones de Von Mises se puede ver que las máximas tensiones son de  $\approx 100$  MPa y se dan en el anillo superior, aunque son puntos muy concretos de la pieza por los que podría romper. Sin embargo, la media de tensiones en el anillo superior es  $\approx 60$  MPa.

### - Desplazamientos (Abaqus/Moldflow/Digimat)

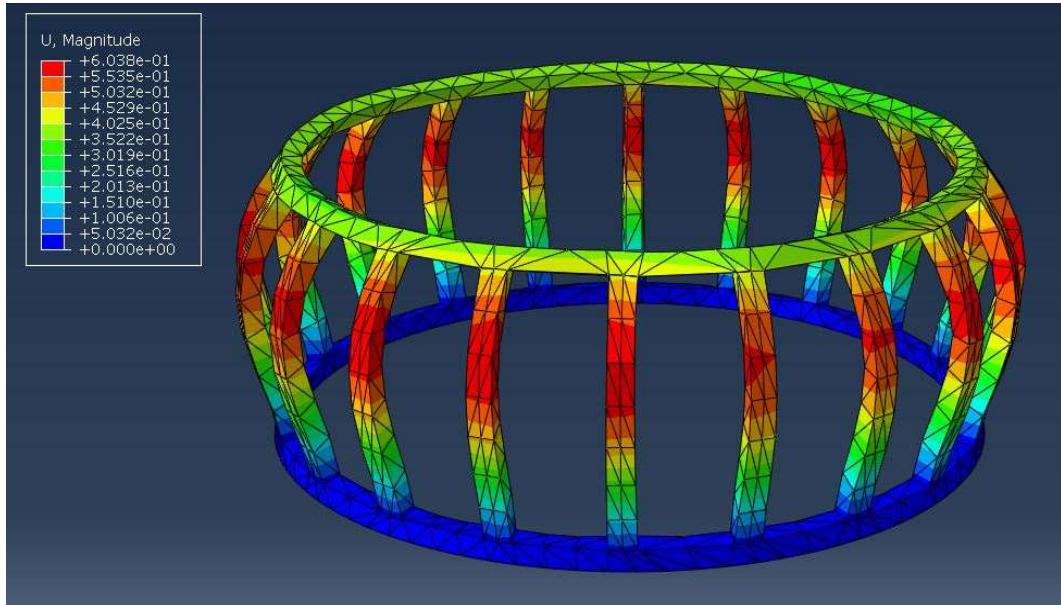


Figura 19

Se observa como en la figura 19, los desplazamientos máximos son del orden de 0.6 mm y se dan en la parte central/superior de los travesaños, ya que es la parte más débil de la jaula. Mientras que en el anillo superior los desplazamientos son de entre 0.35-0.4mm, siendo por tanto más repartidos a lo largo del anillo.

### - Tensión de Von Mises (Abaqus/Moldflow/Digimat)

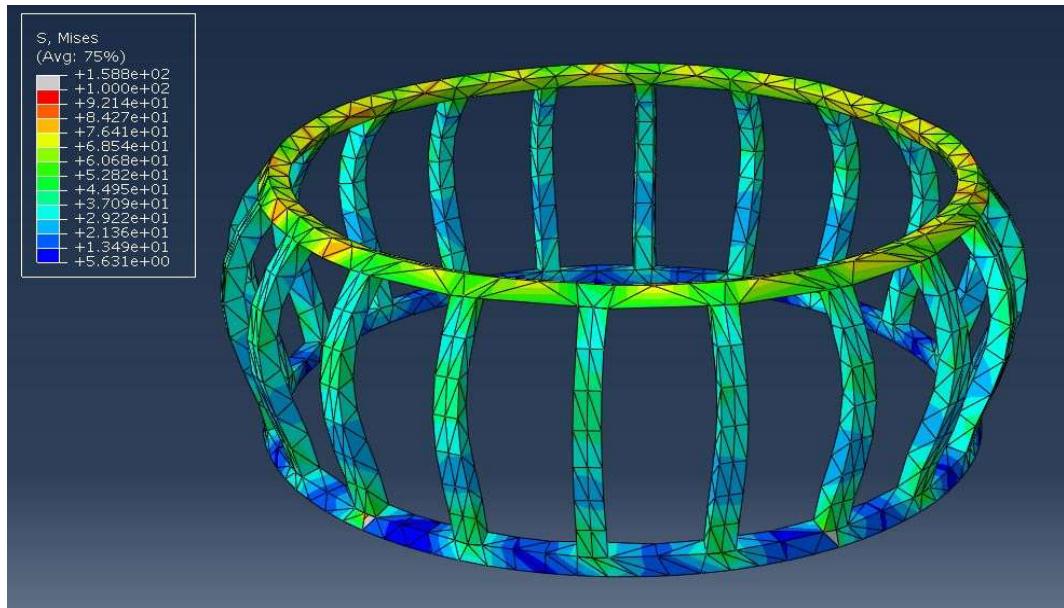


Figura 20

Las tensiones máximas que se encuentran son de  $\approx 100$  MPa y se dan en el anillo superior, aunque la media de tensiones se podría decir que es del orden de 70 MPa. Por el contrario a lo largo de los travesaños, que es la zona que sufre un mayor desplazamiento de la pieza tiene una media de tensiones de  $\approx 35$  MPa.

Pieza	Desplazamientos (mm)	Tensión de Von Mises (MPa)
Abaqus	0.376	100
Abaqus/Moldflow/Digimat	0.600	100

Tabla 3

Se puede observar claramente la influencia de los resultados provenientes del proceso de fabricación en los desplazamientos, ya que teniendo en cuenta la orientación de fibra son un 60 % mayores. Sin embargo, la tensión de Von Mises como era de esperar no cambia ya que no es un resultado dependiente del material, sino de la geometría y cargas impuestas sobre la pieza.

### 3.2 Jaula de alojamiento para rodamientos con reducción de anchura de los travesaños

- **La primera fase:** es la realización de la pieza mediante modelado mecánico a través de SolidWorks, dando lugar a un fichero de extensión “jaulareducida.step”.

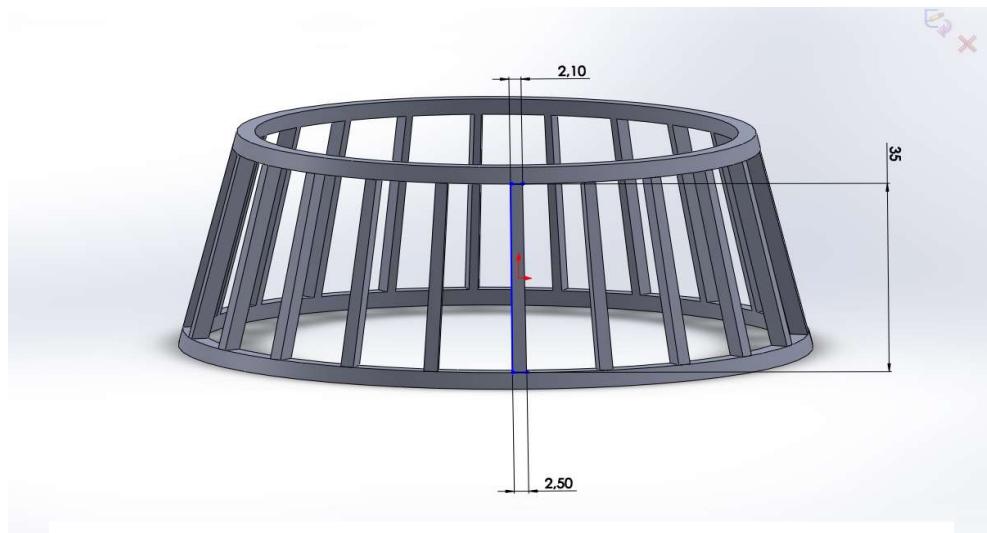


Figura 21

- **En la segunda fase:** se procede con Abaqus a realizar el análisis mecánico, para ello se pondrán como restricciones un empotramiento en el anillo inferior de la jaula y una carga en la cara interna de la jaula de un valor de 3 MPa (Figura 22).

Luego se procede a la generación de un modelo en Abaqus de la pieza (Figura 23), donde la malla de elementos finitos generada tiene 2711 elementos que dará lugar a un fichero de extensión “jaulareducida.inp”. Este sería el único paso a realizar en el caso de que se realizara un análisis mecánico convencional donde no se tendría en cuenta el proceso de fabricación de la pieza.

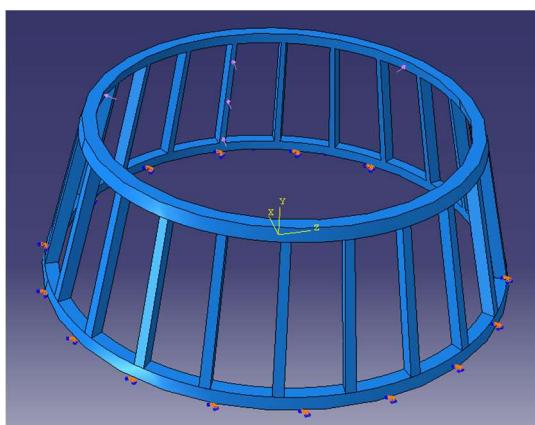


Figura 22

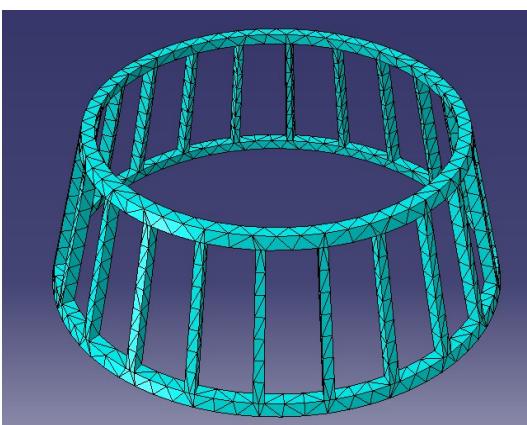


Figura 23

- **La tercera fase:** consiste en realizar el análisis mecánico del proceso de fabricación mediante Moldflow, para ello se realizara una nueva malla sobre la pieza en dicho programa y se deberá definir la geometría de la pieza con sus canales de alimentación, los datos del material escogidos en la biblioteca (Ultramid A3WG6 – poliamida con 30% de fibra de vidrio) y las condiciones del proceso de inyección (Tabla 4).

Parámetros	Valor numérico
Tiempo de inyección	1.5 segundos
Temperatura de inyección	290 °C
Porcentaje de llenado	99 %
Temperatura del molde	85 °C
Presión de compactación	60 MPa
Tiempo de compactación	10 segundos
Tiempo de enfriamiento	20 segundos

Tabla 4

La malla de elementos finitos generada en Moldflow tiene 210400 elementos y dará lugar a un fichero de extensión “jaulareducida.pat”. Tras el análisis reológico es necesario observar diversos resultados que darán validación al proceso de inyección. Estos resultados son los siguientes:

- **Tiempo de llenado:** tiempo que le cuesta a la pieza llenarse de manera completa, como se puede ver en la figura 24, la pieza se llena completamente en el tiempo establecido y lo realiza de manera simultánea, ya que en el anillo inferior el llenado es uniforme realizándose entre el 1.1 s y el 1.5 s. Desde el punto de vista del llenado este diseño favorece un llenado más uniforme en la pieza.

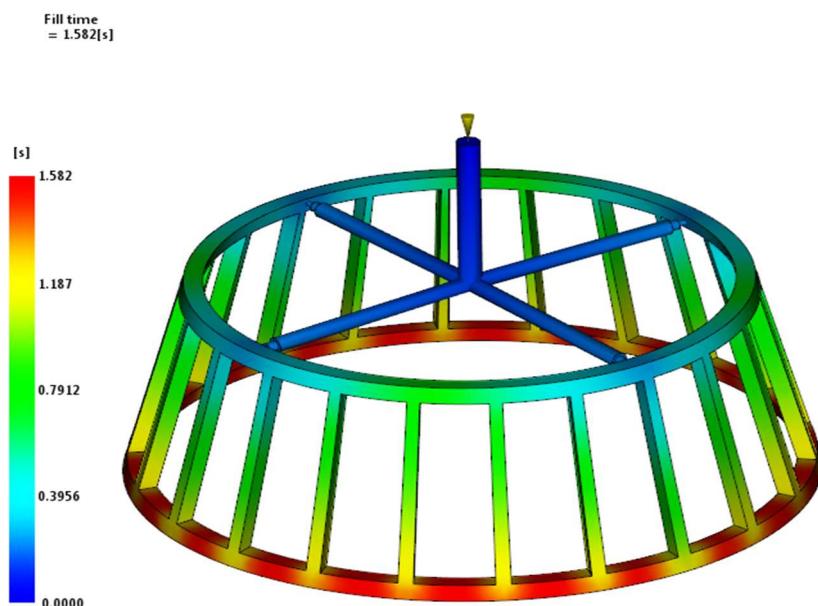


Figura 24

- **Temperatura en el frente de flujo:** temperatura del material durante el tiempo de inyección en la que se admite una variación de 8-10 °C, ya que temperaturas mayores indican que el tiempo de inyección es corto o que se pueden producir defectos superficiales (Figura 25). En el caso particular se observa como en un tiempo de llenado de aproximadamente 1,5 s la variación de temperatura es de unos 6°C.

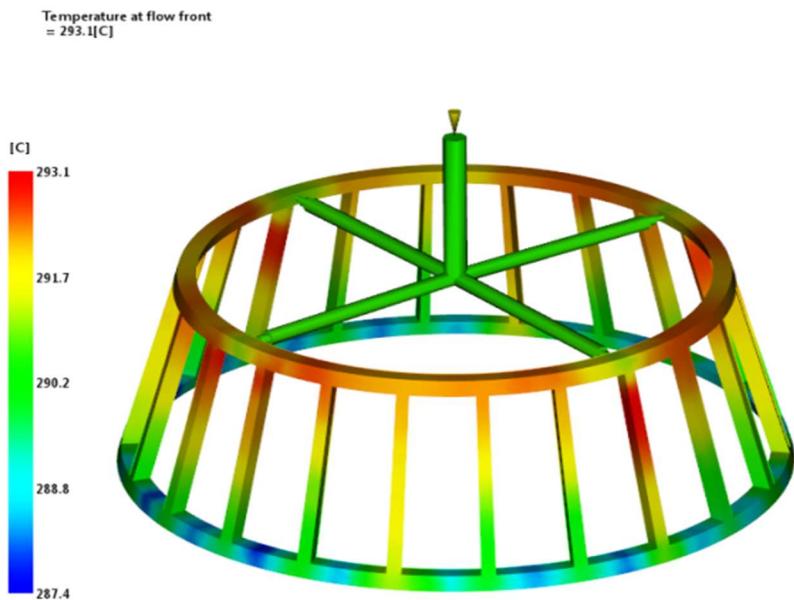


Figura 25

- **Presión de inyección:** presión máxima antes de cambiar a compactación. Se observa como la presión cercana a los puntos de inyección es máxima, en este primer caso es de 35.22 MPa, debido a que es cuando más material tiene que transportar. Siendo un valor mayor debido a su reducción de sección en los travesaños.

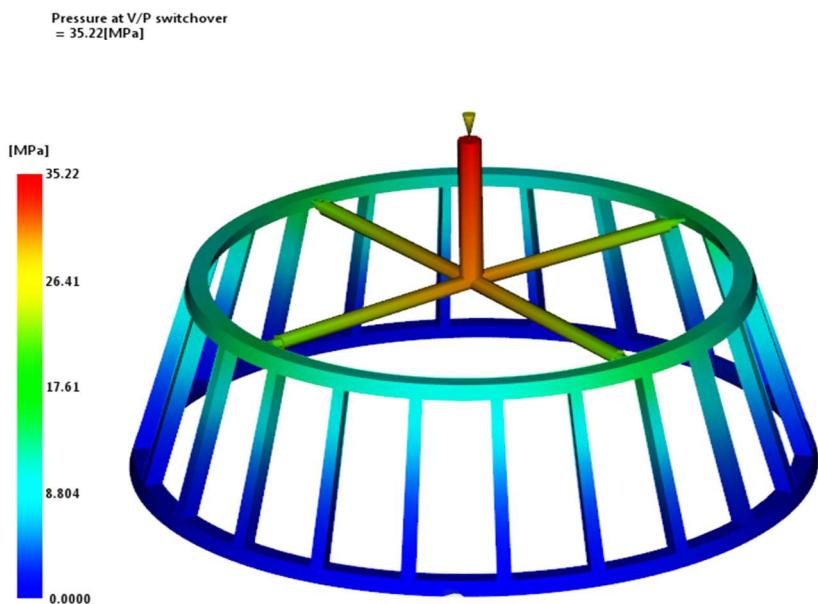


Figura 26

- **Fuerza de cierre:** fuerza máxima para mantener el molde cerrado durante el llenado, siendo para la jaula de 19 Tm el valor máximo y dado en torno a los 2 segundos. Se trata de un valor acorde con la presión de inyección y con la geometría de la pieza.

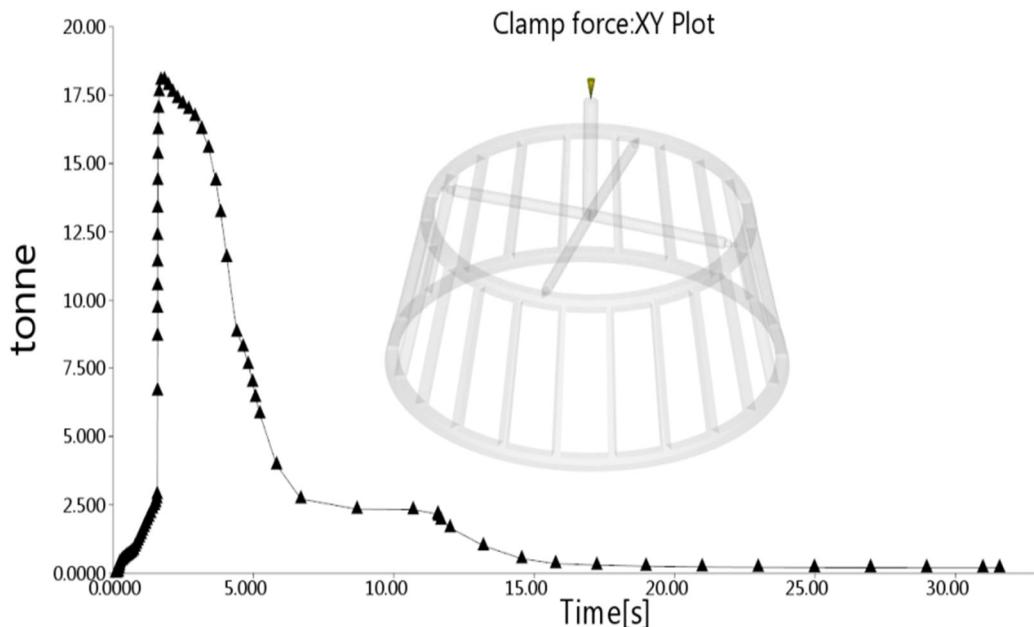


Figura 27

- **Orientación del tensor de fibra:** muestra el grado de orientación de las fibras al final del proceso de moldeado. Donde se observa como la organización de las fibras es en la dirección de avance del flujo de plástico siendo más aleatoria en las zonas donde confluyen varias rutas de flujo de material, en las líneas de soldadura (Figura 28).

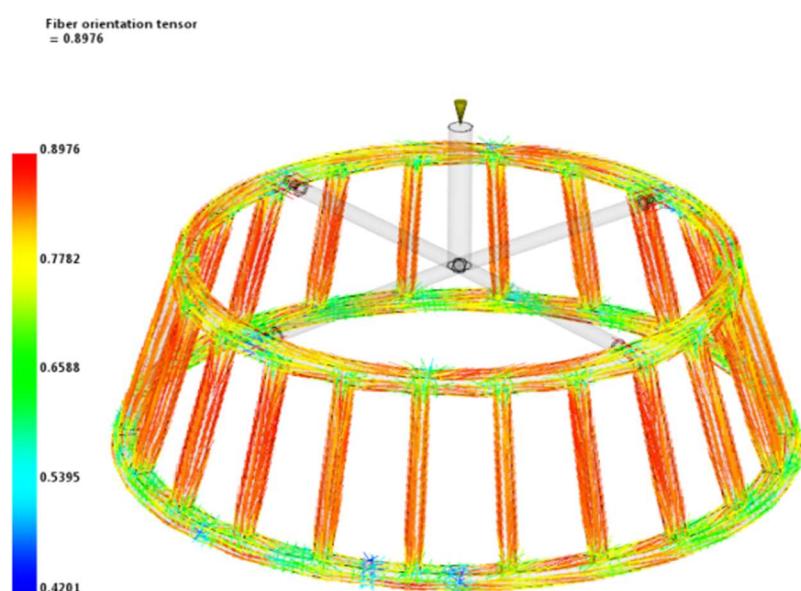


Figura 28

Este último resultado será necesario aplicarlo a la metodología mediante un archivo de extensión “jaulareducida.xml” donde cada elemento de la malla tiene asociado un tensor de orientación de fibra.

- **La cuarta fase:** consistirá en la definición del material compuesto en Digimat RP, para ello se seleccionara un material genérico de la base de datos, para este caso en particular se elegirá un PA66-GF30 (Figura 29 y 30). Sobre este material se aplicara la condición de anisotropía aplicando a cada elemento de la malla el tensor de orientación de fibra.

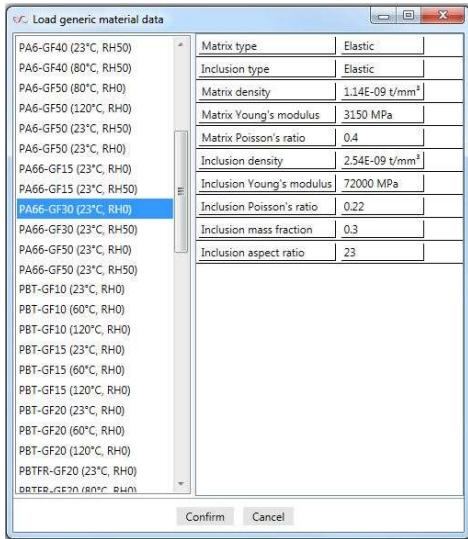


Figura 29



Figura 30

Toda la información relativa al material elegido en la biblioteca de materiales (Figura 29) se almacena en un fichero de extensión “jaulareducida.mat”, mientras que la información relacionada con el tensor de orientación de fibra para cada elemento se almacena en un fichero de extensión “.dof”. Este último fichero será compatible con Abaqus para su posterior lectura de los nuevos resultados.

- **En la quinta fase:** se trata de transferir a la malla de Abaqus, la información de las características del material de la malla de Moldflow, mediante un mapeado.

El proceso a seguir es cargar el modelo estructural de la jaula mediante el fichero “jaulareducida.inp”, se elige un material genérico de Digimat RP y después se carga el proceso de fabricación a través del fichero “jaulareducida.pat” y el fichero “jaulareducida.xml” que hace referencia al tensor de orientación de fibra para cada elemento. Una vez que se han cargado todos los archivos, Digimat RP realiza un mapeo de ambas mallas (Figura 31) y procesa toda la información dando lugar a un fichero “jaulareducida.inp” que contiene una llamada al fichero del material genérico “jaulareducida.mat” y a su vez una llamada al fichero “.dof” correspondiente al tensor de orientación de fibra para cada elemento.

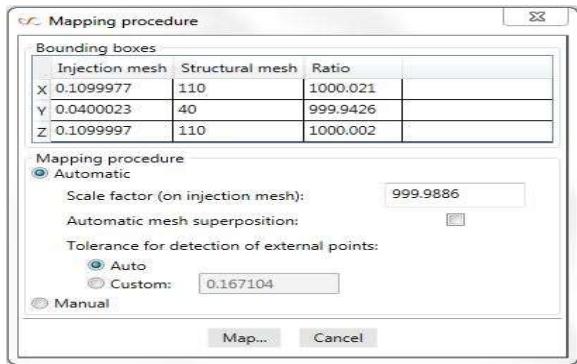


Figura 31

- **La última fase:** es un análisis mecánico-estructural de la pieza generado nuevamente en Abaqus, en el que se podrán ver las principales diferencias entre los dos métodos, uno el que se tiene en cuenta el procesado y la anisotropía del material por medio del tensor de orientación de fibra y el otro método, el que directamente calcula las deformaciones y tensiones sin aplicar la metodología descrita en este apartado. Los resultados que se van a comparar serán el estado tensional caracterizado en la máxima tensión de Von Mises y el máximo desplazamiento.

### - Desplazamientos (Abaqus)

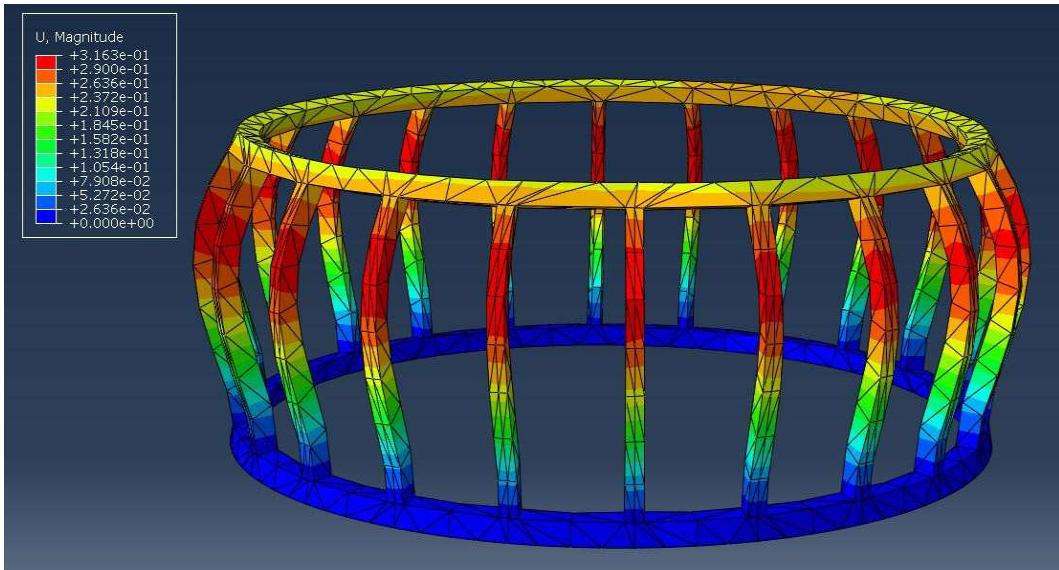


Figura 32

Para el segundo caso, donde se ha reducido la anchura de los travesaños y se ha aumentado su número para conseguir una mayor capacidad de carga, se observa que los máximos desplazamientos son, al igual que en el primer caso, en los travesaños, aunque consiguiendo unos desplazamientos menores, en torno a 0.31 mm, siendo por tanto menos propenso a sufrir deformación plástica.

### - Tensión de Von Mises (Abaqus)

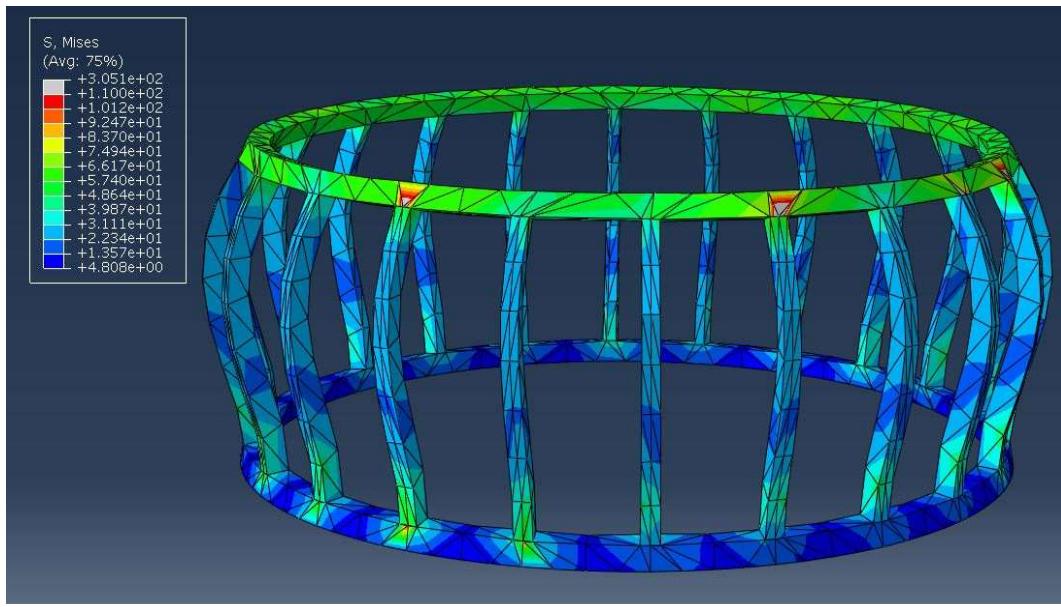


Figura 33

En el caso de la tensión de Von Mises, para este segundo caso se repite el lugar de la pieza donde son mayores, es decir, en el anillo superior, aunque la media de estas tensiones en esa zona es de 66 MPa, hay picos de máxima tensión en puntos muy concretos que pueden llegar a los 110 MPa. Por tanto, las tensiones que debe soportar este tipo de jaula son ligeramente mayores debido a la reducción de sus travesaños.

### - Desplazamientos (Abaqus/Moldflow/Digimat)

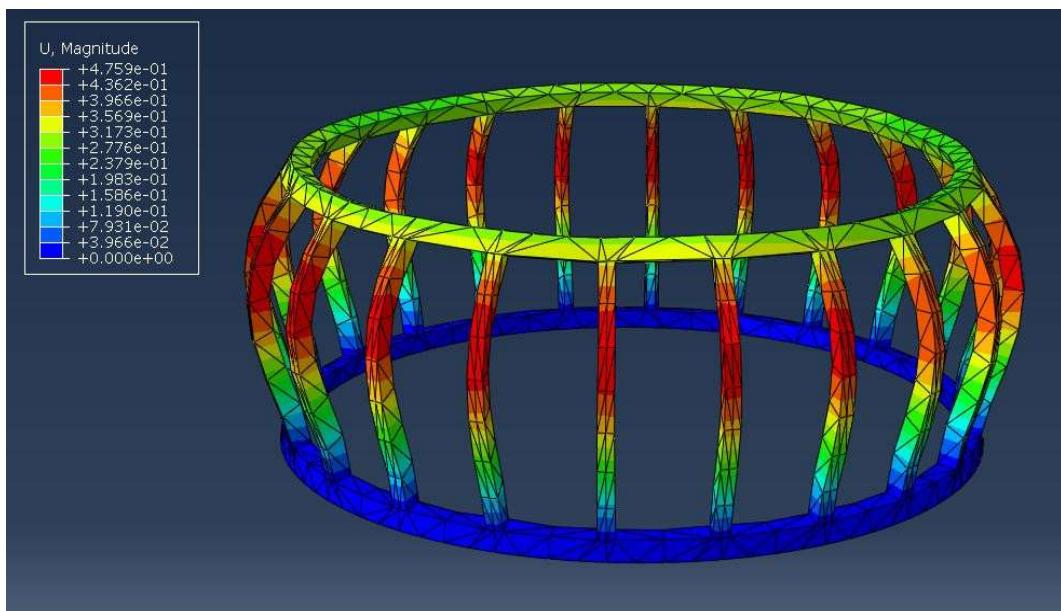


Figura 34

En este segundo caso, donde se ha reducido la anchura de los travesaños se puede observar que los máximos desplazamientos se dan en la misma zona que en el caso uno, es decir, en los travesaños, siendo de magnitud 0.47 mm. Por el contrario, el anillo superior sufre un desplazamiento del orden de 0.28 mm.

### - Tensión de Von Mises (Abaqus/Moldflow/Digimat)

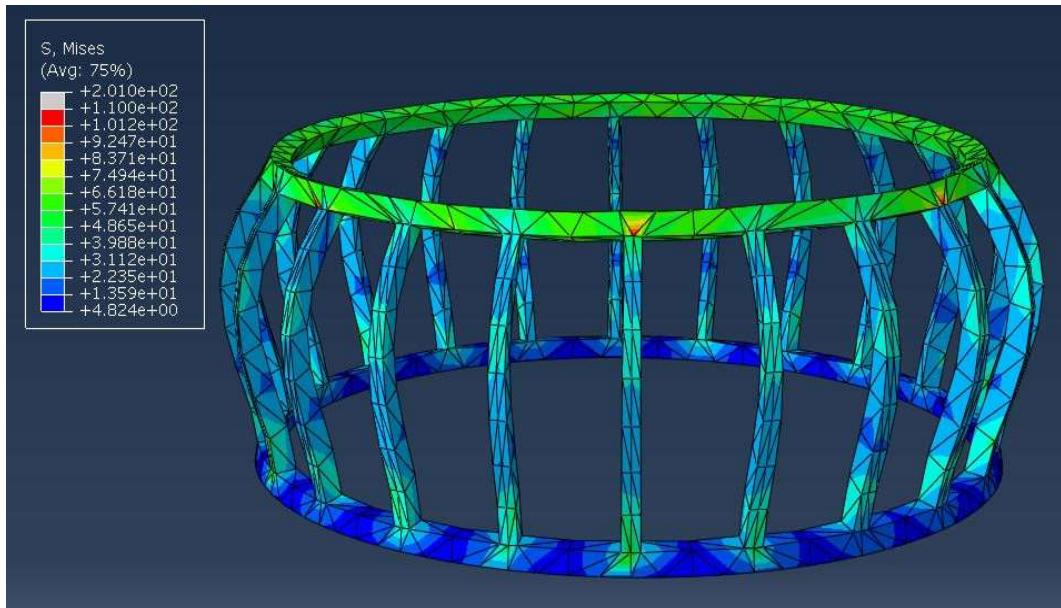


Figura 35

En relación a las tensiones de Von Mises, se ven que las máximas tensiones son soportadas por el anillo superior, teniendo picos de magnitud de 110 MPa, aunque la media de tensiones que debe soportar es del orden de 66 MPa. En su lugar, los travesaños deben soportar muchas menores tensiones siendo de unos 22 MPa.

Pieza	Desplazamientos (mm)	Tensión de Von Mises (MPa)
Abaqus	0.316	110
Abaqus/Moldflow/Digimat	0.475	110

Tabla 5

Los resultados provenientes del proceso de fabricación en los desplazamientos son un 60% mayor teniendo en cuenta la orientación de fibra, aunque son de menor valor que en el primer caso. Sin embargo, la tensión de Von Mises como era de esperar no cambia apenas ya que no es un resultado dependiente del material, sino de la geometría y cargas impuestas sobre la pieza.

### 3.3 Ensamblaje entre jaula de alojamiento para rodamientos y un refuerzo en el travesaño

- **La primera fase:** es la realización de la pieza mediante modelado mecánico a través de SolidWorks, dando lugar a un fichero de extensión “jaulareforzada.step”.

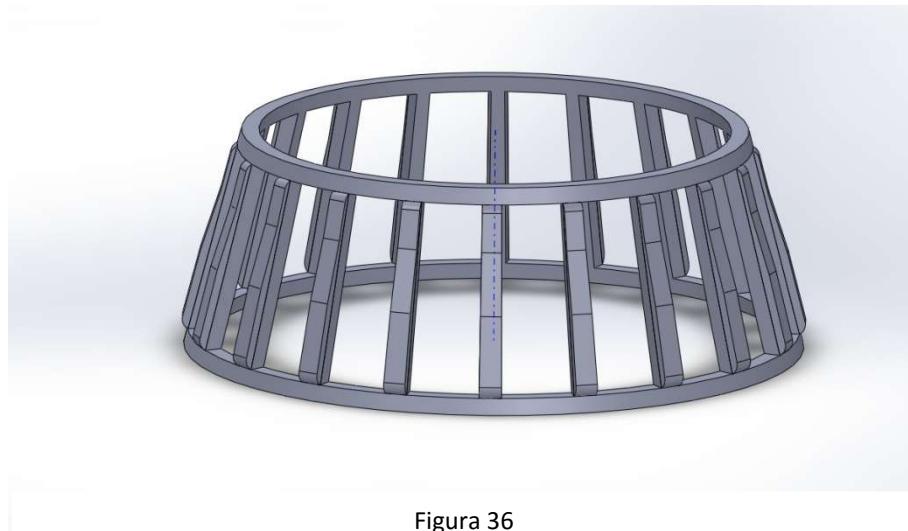


Figura 36

- **En la segunda fase:** se procede con Abaqus a realizar el análisis mecánico, para ello se pondrán como restricciones un empotramiento en el anillo inferior de la jaula y una carga en la cara interna de la jaula de un valor de 3 MPa (Figura 37).

Luego se procede a la generación de un modelo en Abaqus de la pieza (Figura 38), donde la malla de elementos finitos generada tiene 3477 elementos que dará lugar a un fichero de extensión “jaulareforzada.inp”. Este sería el único paso a realizar en el caso de que se realizara un análisis mecánico convencional donde no se tendría en cuenta el proceso de fabricación de la pieza.

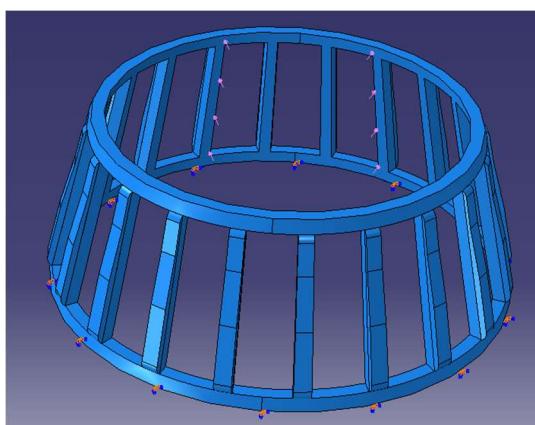


Figura 37

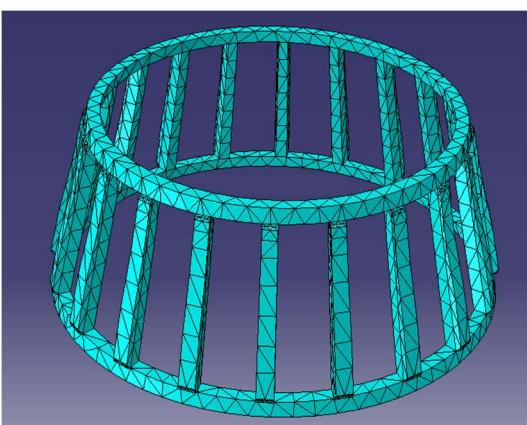


Figura 38

- **La tercera fase:** consiste en realizar el análisis mecánico del proceso de fabricación mediante Moldflow, para ello se realizara una nueva malla sobre la pieza en dicho programa y se deberá definir la geometría de la pieza con sus canales de alimentación, los datos del material escogidos en la biblioteca de materiales (Ultramid A3WG6 – poliamida con 30% de fibra de vidrio) y las condiciones del proceso de inyección (Tabla 6).

Parámetros	Valor numérico
Tiempo de inyección	1.5 segundos
Temperatura de inyección	290 °C
Porcentaje de llenado	99 %
Temperatura del molde	85 °C
Presión de compactación	60 MPa
Tiempo de compactación	10 segundos
Tiempo de enfriamiento	20 segundos

Tabla 6

La malla de elementos finitos generada en Moldflow tiene 482490 elementos y dará lugar a un fichero de extensión “jaula.pat”. Tras el análisis reológico es necesario observar diversos resultados que darán validación al proceso de inyección. Estos resultados son los siguientes:

· **Tiempo de llenado:** tiempo que le cuesta a la pieza llenarse de manera completa, como se puede ver en la figura 39, la pieza se llena completamente en el tiempo establecido pero no de manera similar, ya que el anillo inferior se llena de manera diferente, habiendo zonas que terminan de llenarse a los 0.8 s y otras a los 1.5 s.

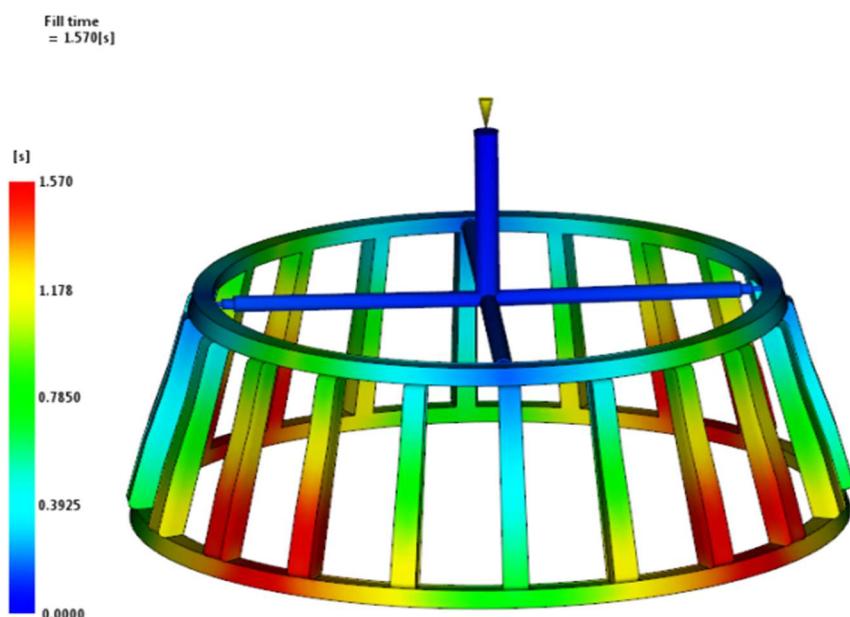


Figura 39

- **Temperatura en el frente de flujo:** temperatura del material durante el tiempo de inyección en la que se admite una variación de 8-10 °C, ya que temperaturas mayores indican que el tiempo de inyección es corto o que se pueden producir defectos superficiales (Figura 40). En el caso particular se observa como en un tiempo de llenado de aproximadamente 1,5 s la variación de temperatura es de unos 6°C.

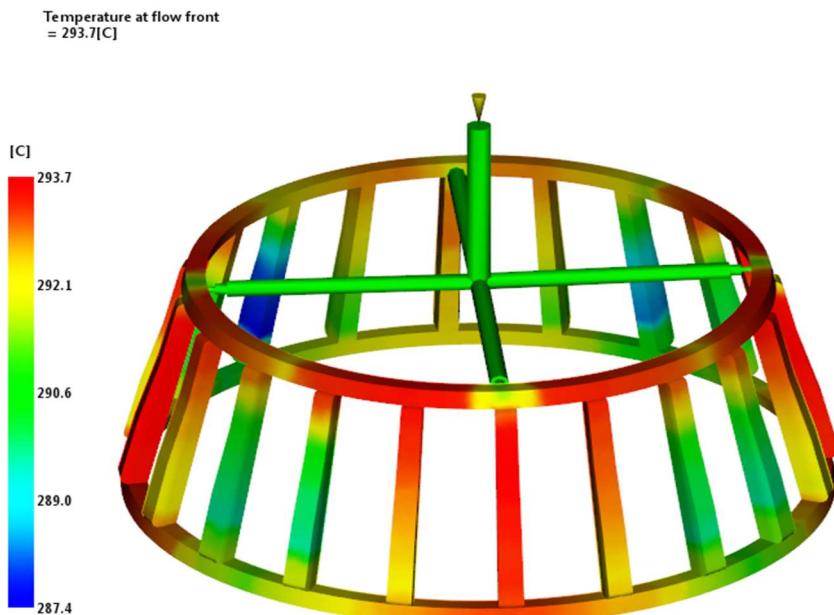


Figura 40

- **Presión de inyección:** presión máxima antes de cambiar a compactación. Se observa como la presión cercana a los puntos de inyección es máxima, en este primer caso es de 31,73 MPa, debido a que es cuando más material tiene que transportar.

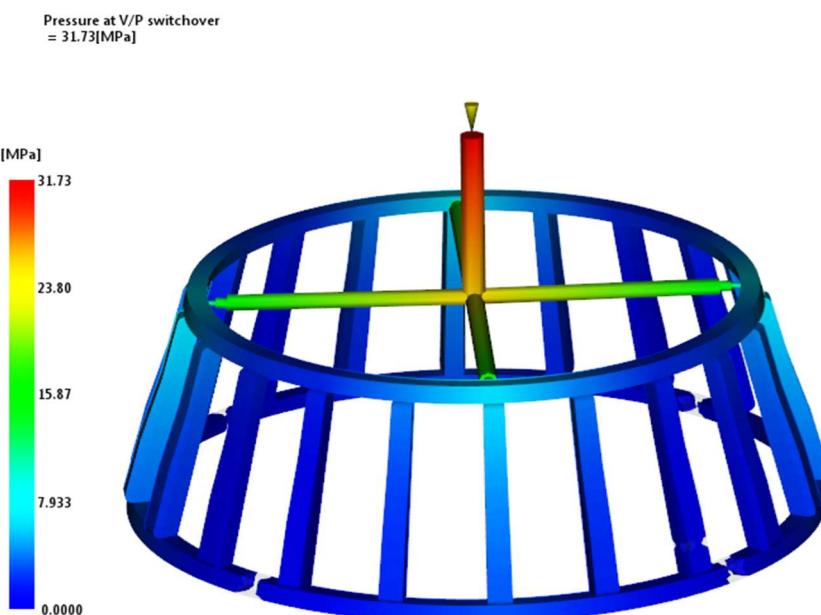


Figura 41

- **Fuerza de cierre:** fuerza máxima para mantener el molde cerrado durante el llenado, siendo para la jaula de 20 Tm el valor máximo y dado en torno a los 2 segundos. Se trata de un valor acorde con la presión de inyección y con la geometría de la pieza.

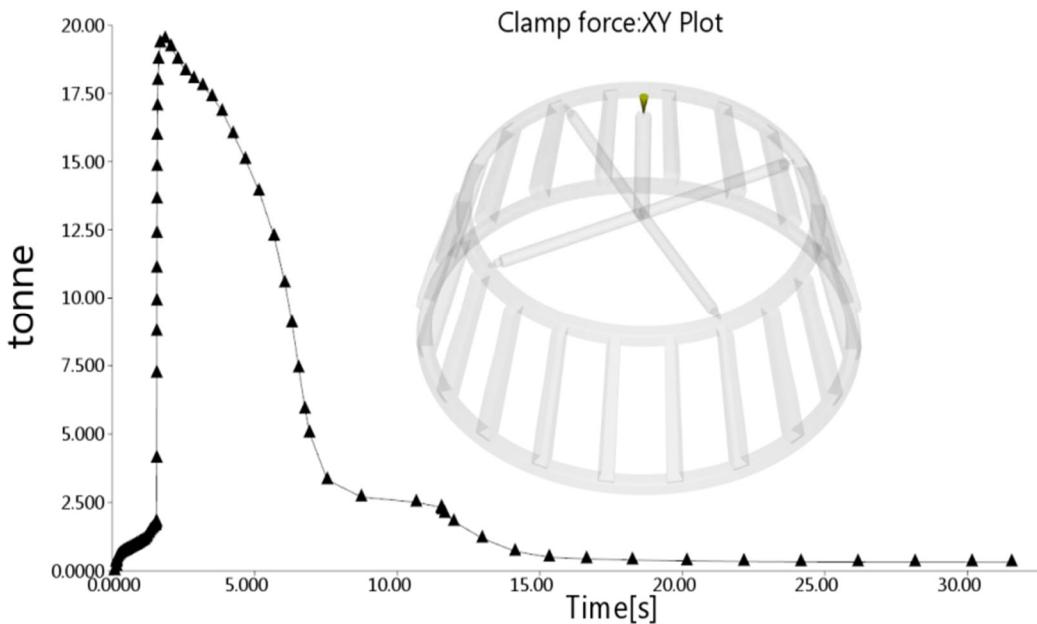


Figura 42

- **Orientación del tensor de fibra:** muestra el grado de orientación de las fibras al final del proceso de moldeado. Donde se observa como la organización de las fibras es en la dirección de avance del flujo de plástico siendo más aleatoria en las zonas donde confluyen varias rutas de flujo de material, en las líneas de soldadura (Figura 43).

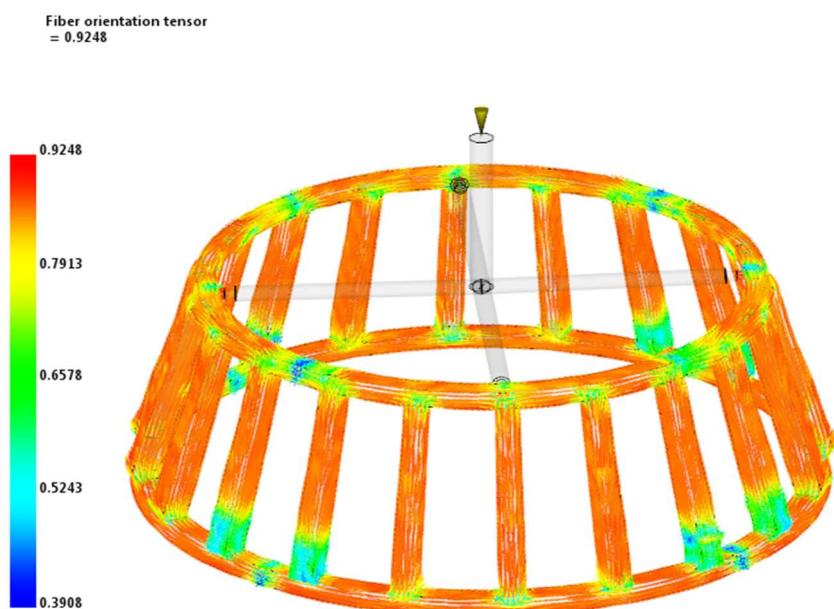


Figura 43

Este último resultado será necesario aplicarlo a la metodología mediante un archivo de extensión “jaulareforzada.xml” donde cada elemento de la malla tiene asociado un tensor de orientación de fibra.

- **La cuarta fase:** consistirá en la definición del material compuesto en Digimat RP, para ello se seleccionara un material genérico de la base de datos, para este caso en particular se elegirá un PA66-GF30 (Figura 44 y 45). Sobre este material se aplicara la condición de anisotropía aplicando a cada elemento de la malla el tensor de orientación de fibra.

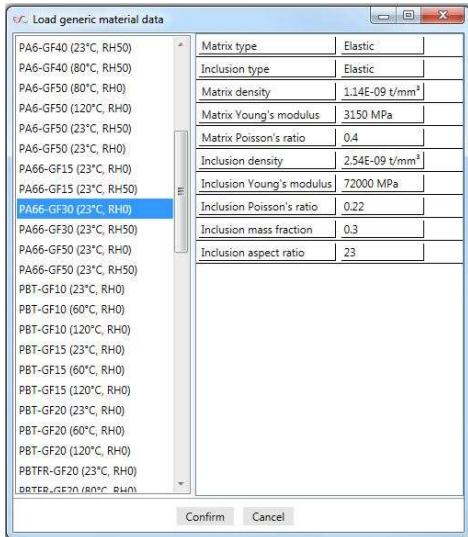


Figura 44

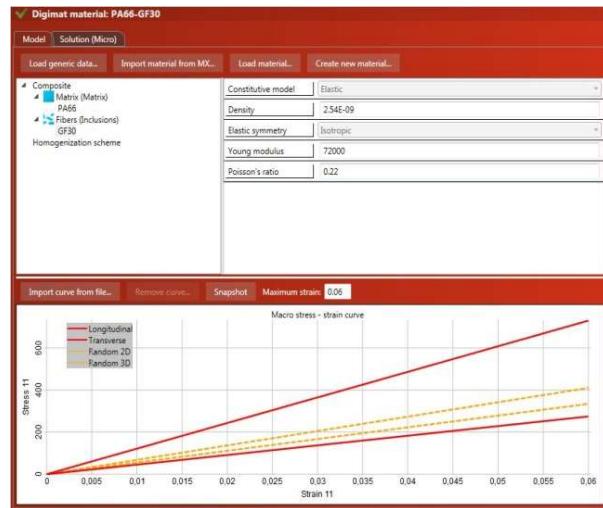


Figura 45

Toda la información relativa al material elegido en la biblioteca de materiales (Figura 45) se almacena en un fichero de extensión “jaulareforzada.mat”, mientras que la información relacionada con el tensor de orientación de fibra para cada elemento se almacena en un fichero de extensión “.dof”. Este último fichero será compatible con Abaqus para su posterior lectura de los nuevos resultados.

- **En la quinta fase:** se trata de transferir a la malla de Abaqus, la información de las características del material de la malla de Moldflow, mediante un mapeado.

El proceso a seguir es cargar el modelo estructural de la jaula mediante el fichero “jaulareforzada.inp”, se elige un material genérico de Digimat RP y después se carga el proceso de fabricación a través del fichero “jaulareforzada.pat” y el fichero “jaulareforzada.xml” que hace referencia al tensor de orientación de fibra para cada elemento. Una vez que se han cargado todos los archivos, Digimat RP realiza un mapeo de ambas mallas (Figura 46) y procesa toda la información dando lugar a un fichero “jaulareforzada.inp” que contiene una llamada al fichero del material genérico “jaulareforzada.mat” y a su vez una llamada al fichero “.dof” correspondiente al tensor de orientación de fibra para cada elemento.

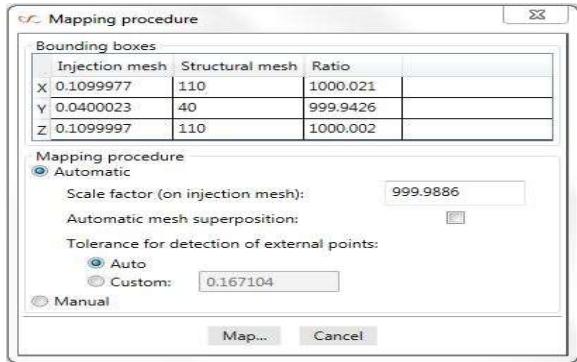


Figura 46

- **La última fase:** es un análisis mecánico-estructural de la pieza generado nuevamente en Abaqus, en el que se podrán ver las principales diferencias entre los dos métodos, uno el que se tiene en cuenta el procesado y la anisotropía del material por medio del tensor de orientación de fibra y el otro método, el que directamente calcula las deformaciones y tensiones sin aplicar la metodología descrita en este apartado. Los resultados que se van a comparar serán el estado tensional caracterizado en la máxima tensión de Von Mises y el máximo desplazamiento.

### - Desplazamientos (Abaqus)

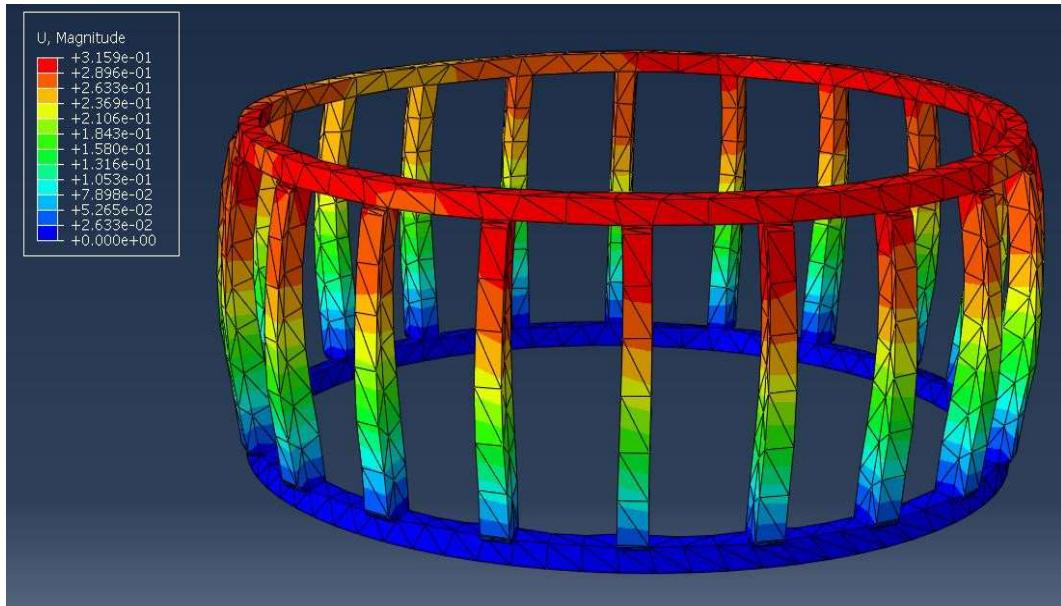


Figura 47

Para este último caso, al ver que la zona que más sufría de la jaula son los travesaños, se ha impuesto un refuerzo sobre cada uno de ellos, consiguiendo de esta manera mayor rigidez en cada uno de ellos. Como se puede observar en la figura 47, el máximo desplazamiento es de 0.31 mm pero ya no se da en la zona central del travesaño sino

que se encuentra en el anillo superior de la jaula. Por tanto, con este sistema se ha conseguido reducir la flexibilidad de los travesaños.

### - Tensión de Von Mises (Abaqus)

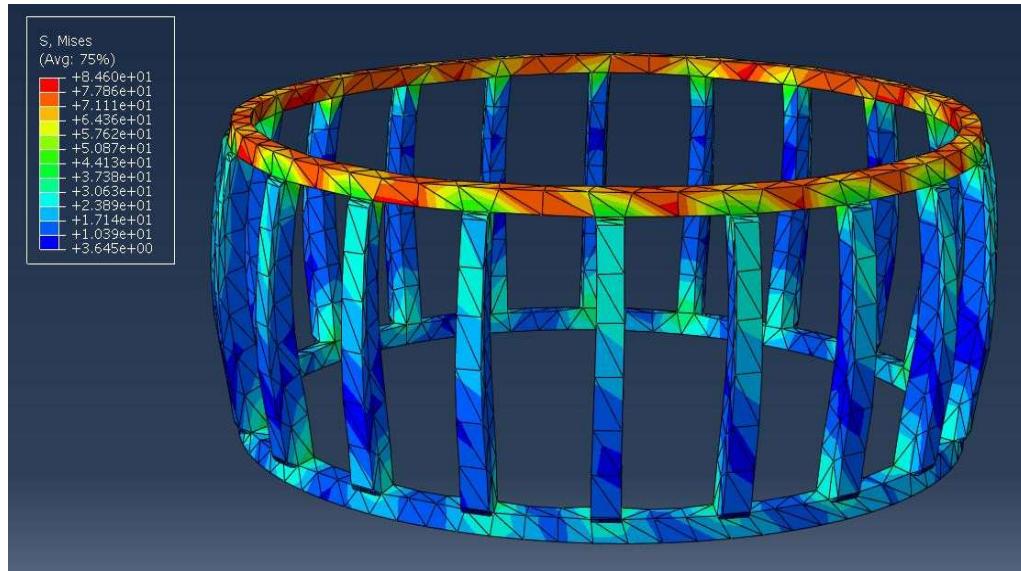


Figura 48

En relación a la tensión de Von Mises se han conseguido reducir la magnitud, siendo el máximo 85 MPa y también la zona de influencia, siendo actualmente en el anillo superior. Por el contrario, esta máxima tensión no se produce solo en ciertas zonas de la jaula sino que están a lo largo de todo el anillo superior.

### - Desplazamientos (Abaqus/Moldflow/Digimat)

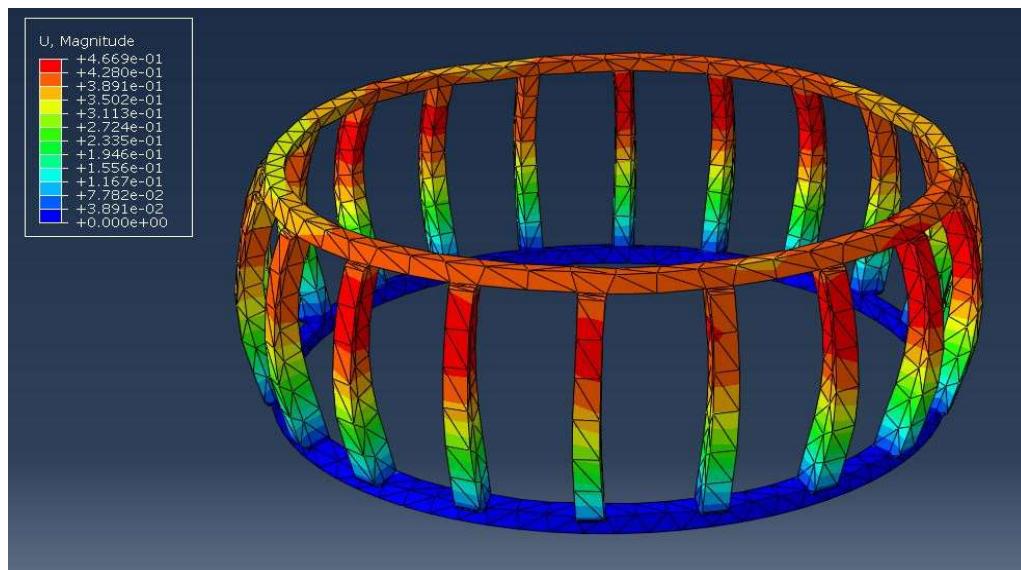


Figura 49

Para este ultimo caso, los desplazamientos maximos se producen en las zonas superiores de los travesaños con una magnitud de 0.46 mm, aunque en este caso el anillo superior tambien sufre unos mayores desplazamientos que en los dos casos anteriores, siendo estos desplazamientos del orden de 0.39 mm.

### - Tensión de Von Mises (Abaqus/Moldflow/Digimat)

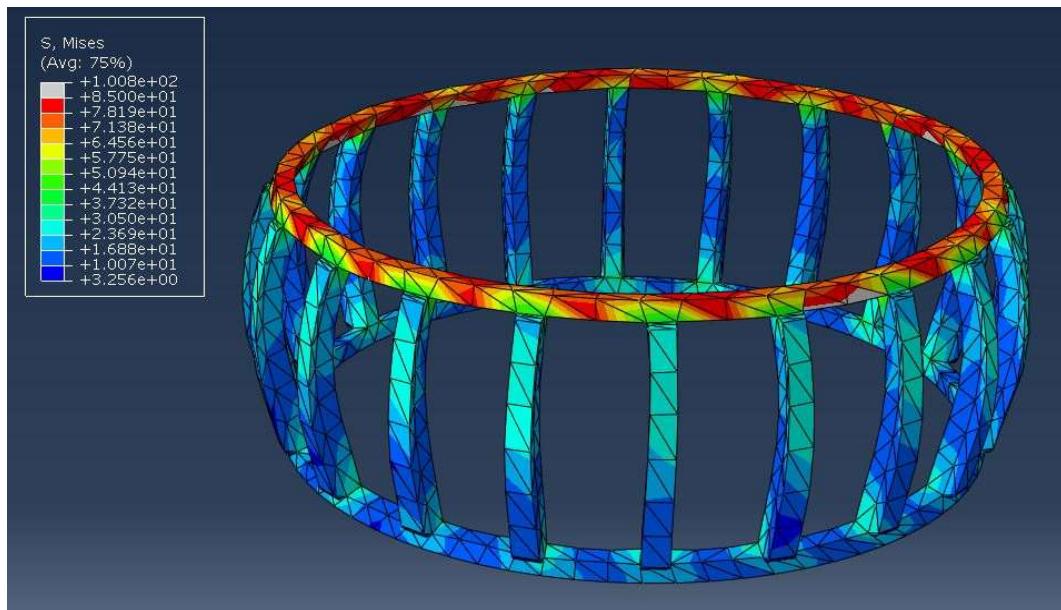


Figura 50

En este último caso la tensión de Von Mises máxima es de 85 MPa y lo soporta el anillo superior, aunque esta tensión solo se produce en escasos puntos de la jaula, siendo por tanto, la media de tensiones de 60 MPa. Respecto a los travesaños, soportan mucha menor tensión, siendo de unos 30 MPa.

Pieza	Desplazamientos (mm)	Tensión de Von Mises (MPa)
Abaqus	0.315	85
Abaqus/Moldflow/Digimat	0.466	85

Tabla 7

Se puede observar claramente la influencia de los resultados provenientes del proceso de fabricación en los desplazamientos, ya que teniendo en cuenta la orientación de fibra son un 60 % mayores. Sin embargo, la tensión de Von Mises como era de esperar no cambia apenas ya que no es un resultado dependiente del material, sino de la geometría y cargas impuestas sobre la pieza.

## 4. Comparación de resultados

En este apartado se procederá a realizar una breve relación de los resultados expuestos, tanto del proceso de fabricación como los del análisis mecánico, con ello se podrá discernir cual de los 3 casos es más fiable en su función y cómo influye la nueva metodología a la hora de tomar una decisión coherente.

RESULTADOS DEL PROCESO DE FABRICACIÓN			
	Jaula original	Jaula con menos anchura	Jaula reforzada
<b>Llenado uniforme</b>	NO	SI	NO
<b>Presión de inyección - MPa</b>	28.03	35.22	31.73
<b>Temperatura en el frente de flujo - °C (máxima temperatura)</b>	292.5	293.1	293.7
<b>Temperatura en el frente de flujo - °C(variación de temperatura)</b>	3.8	5.7	6.3
<b>Fuerza de cierre – Tn</b>	20	19	20

Tabla 8

RESULTADOS DEL PROCESO DE FABRICACIÓN			
	Jaula original	Jaula con menos anchura	Jaula reforzada
<b>Desplazamientos (Abaqus) - mm</b>	0.376	0.316	0.315
<b>Desplazamientos (Abaqus/Moldflow/Digimat) - mm</b>	0.600	0.475	0.466
<b>Tensión de Von Mises (Abaqus)- MPa</b>	100	110	85
<b>Tensión de Von Mises (Abaqus/Moldflow/Digimat) - MPa</b>	100	110	85

Tabla 9

Cuando se realiza el análisis de los resultados respecto al proceso de fabricación se puede observar que todos ellos son muy similares, aunque hay pequeñas diferencias que se tienen que tener en cuenta. Por ejemplo, en el llenado uniforme de la pieza en el tiempo estimado se ve como la jaula con menor anchura es la que mejor llenado tiene ya que todo el plástico se inyecta de manera uniforme en la parte inferior de la jaula mientras que los otros dos casos varía, llegando a algunas zonas del anillo inferior en torno al segundo de inyección y a otros al segundo y medio.

Respecto a la presión de inyección, la máxima se da en la jaula con menor anchura, ya que al tener menor espesor se necesita mayor presión para que el material avance a través de la pieza, aunque las diferencias de presión son tan pequeñas que no es un aspecto a tener muy en cuenta.

Por último, respecto a la temperatura de inyección, los 3 casos están a una temperatura similar y su diferencia de temperatura esta dentro del rango establecido de 8°C, mientras que la fuerza de cierre es de en torno a 20 MPa, una fuerza de cierre de pequeña magnitud debido a que el área proyectada es muy pequeño al ser hueca la pieza y que está relacionada con la presión de inyección.

Como cabía de esperar en los resultados de tensiones de Von Mises, la tensión varia únicamente respecto a los diferentes casos, siendo la que menor tensión tiene el tercer caso con unas tensiones máximas del orden de 85 MPa, aunque hay que tener en cuenta que los valores son inferiores a la tensión de rotura (180 MPa), por lo tanto hay margen de trabajo.

En contra, los desplazamientos se modifican en torno al 60 % al incluir el proceso de fabricación en el análisis mecanico-estructural de la pieza, en concreto, el tensor de orientación de fibra. En todos se modifican el mismo porcentaje, aunque tanto el segundo caso como el tercero sufren un menor desplazamiento en su geometría ya sea por el aumento de travesaños o por la mayor rigidez impuesta.

## 5. Conclusión

Se ha desarrollado una metodología de trabajo en la que cuando se realiza el análisis mecánico-estructural se puede observar la importancia del proceso de fabricación de materiales compuestos. Sobre todo a través de un resultado concreto, el tensor de orientación de fibra.

La metodología descrita se ha realizado a través de 3 jaulas de alojamiento para rodamientos de geometrías similares, con las mismas condiciones de carga y el mismo material compuesto (Ultramid A3WG6 – poliamida con 30 % de fibra de vidrio) para comparar los resultados de desplazamientos y tensión de Von Mises aplicando la metodología o sin su aplicación.

También se ha realizado una comparación respecto a los resultados principales del proceso de fabricación destacando el caso dos como el mejor llenado, ya que se realiza de manera simultánea aunque también con la mayor presión de inyección debido a la menor anchura de los travesaños.

Los resultados revelan que en todas las jaulas los desplazamientos son del orden del 60 % mayor al aplicar la metodología, es decir, al tener en cuenta el tensor de orientación de fibras, que sin su aplicación, mientras que el estado de tensiones es muy similar ya que este resultado no es dependiente del material sino de las condiciones de carga aplicadas, un aspecto que no se modifica.

Al divisar estos resultados se puede deducir que el proceso de fabricación influye en muy fuerte medida, a través del tensor de orientación de fibra, en el análisis mecánico-estructural de los materiales compuestos y para asemejarnos a la realidad cuando se proceda a la fabricación mediante moldeo por inyección será necesario tener en cuenta este aspecto y no solo las condiciones de carga impuestas. Por tanto, esta metodología será un procedimiento indispensable para conseguir un nivel de precisión en los resultados.

Esta metodología podrá ser usada en cualquier componente de plástico inyectado fabricado a través de un material compuesto, ayudando a la obtención de productos innovadores, optimizados y eficaces.

## 5. Bibliografía

1. SKF: *Lideres en tecnología de rodamientos* [En línea] Disponible en: <http://www.skf.com/es/products/bearings-units-housings/roller-bearings/principles/bearing-data-general/cages/index.html>
2. Gómez González, Sergio (2010) *SolidWorks Simulation* Paracuellos de Jarama (Madrid): Ra-Ma, D.L. ISBN: 9788499640068
3. Gómez González, Sergio *SolidWorks* (2008) Barcelona: Marcombo; México D. F.: Alfaomega. ISBN: 9788426714589
4. Grupo CARMAN. *Formación, Ingeniería e Interiorismo SL* [En línea] Disponible en: <http://grupocarman.com/blog/croquizado-en-solidworks/>
5. Blogspot: *Tecnología de los plásticos* [En línea] Copyright 2011 Disponible en: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.es/2011/06/inyeccion-de-materiales-plasticos-ii.html>
6. Sanmetal: *Termoplásticos, poliamida 6,6* [En línea] Disponible en: <http://www.sanmetal.es/productos/termoplasticos/poliamida-66-pa-66/8>
7. Electrocome: *Metales y plásticos técnicos* [En línea] Disponible en: <http://www.electrocome.com/p-1-43/POLIAMIDA-66--FIBRA-DE-VIDRIO-PA66--GF30.htm>
8. Escuela de ingenierías industriales UVA: *Estructura química* [En línea] Copyright 2005 Disponible en: [http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05-06/nylon/Nylon\\_file/page0002.htm](http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05-06/nylon/Nylon_file/page0002.htm)
9. *Documentation Release 5.1.1 e-Xtream engineering* Copyright 2014
10. Y. Uzcátegui Flores, Maylett *Abaqus programa de elementos finitos* Mérida, Venezuela [En línea] Disponible en: [http://www.cecalc.ula.ve/documentacion/tutoriales/abaqus/introduccion\\_abaqus.pdf](http://www.cecalc.ula.ve/documentacion/tutoriales/abaqus/introduccion_abaqus.pdf)
11. D. Roman, Nadia *Guía de modelado con el software Abaqus* Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Santa Fe, 2013 [En línea] Disponible en: [http://extranet.frsf.utn.edu.ar/application/uploads/GIMNI/archivos/guia\\_abaqus.pdf](http://extranet.frsf.utn.edu.ar/application/uploads/GIMNI/archivos/guia_abaqus.pdf)
12. Dassault Systems Simulia Coorp., *Abaqus/CAE Student Edition 6.11-2 Documentation* 2011

13. Castany, Francisco Javier, Martínez, Arantza y Aisa, Jorge (2013) *Diseño y desarrollo de componentes de plástico inyectados (I): el material* Prensas de la Universidad de Zaragoza. ISBN: 978-84-15770-92-3
14. Castany, Francisco Javier (2014) *Diseño y desarrollo de componentes de plástico inyectados (II): la pieza* Prensas de la Universidad de Zaragoza. ISBN: 978-84-16272-03-7

# Anexo 1: Jaula de rodamientos

1. Definición de rodamiento.....	45
2. Tipos de rodamientos.....	45
3. Componentes de los rodamientos.....	46
· Elementos rodantes	
· Anillos rodantes	
· Jaula:	
- Funciones	
- Proceso de fabricación y material empleado	
- Tipo de guía	
4. Rediseño de componentes metálicos a plásticos.....	51
· Mecanismos de transferencia de calor:	
- Conducción	
- Convección	
- Radiación	
· Conductividad	
· Calor específico	
· Difusividad térmica	
· Tiempo de refrigeración	

## **1. Rodamientos**

Elemento mecánico que reduce la fricción entre un eje y las piezas conectadas a éste por medio de rodadura, le sirve de apoyo y facilita su desplazamiento.

El elemento rotativo que puede emplearse en la fabricación del rodamiento puede ser de bolas, de rodillos o de agujas.

En los rodamientos el movimiento rotativo, según el sentido del esfuerzo que soporta, puede ser axial (si soporta esfuerzos en la dirección de su eje, como por ejemplo las bisagras de las puertas), radial (si soporta esfuerzos en la dirección normal a la dirección que pasa por el centro de su eje, como por ejemplo una rueda), o una combinación de ambos (puede soportar ambos tipos tanto de forma alternativa como combinada).

## **2. Tipos de rodamientos**

Entre los más usados se encuentran:

- Rodamiento rígido de bolas: amplio campo de aplicación, pueden operar a altas velocidades de funcionamiento y requieren poco mantenimiento (Figura 1.2.1).
- Rodamiento de bolas a rótula: Tienen dos hileras de bolas que apoyan sobre un camino de rodadura esférico en el aro exterior, permitiendo desviaciones angulares del eje respecto al soporte. Se usan para aplicaciones donde se puedan producir desalineaciones del eje como las cajas de engranaje.
- Rodamiento de rodillos cilíndricos: tienen como función absorber cargas puramente radiales, pueden ser desmontables y están provistos de una hilera de rodillos.
- Rodamiento de agujas: tienen gran capacidad de carga y son apropiados para aplicaciones donde el espacio es limitado, como por ejemplo en los pedales de bicicletas (Figura 1.2.2).

Respecto a la carga que soportan, los rodamientos de bolas soportan la carga a través de un área de contacto muy pequeña (carga puntual), por tanto, estos rodamientos no pueden ser sometidos a cargas muy pesadas en cambio en los rodamientos de rodillos la carga se soporta a través de un área de contacto muy grande (contacto lineal) por lo que son ideales para cargas medias o pesadas. En contrapartida la fricción en los rodamientos de bolas es menor que en los rodamientos de rodillos.

En los rodamientos de rodillos se utilizan rodillos cilíndricos, esféricos o cónicos, de los cuales toman su denominación, si bien en el caso de rodillos esféricos preferimos utilizar la denominación de rodamientos de rodillos a rotula.



Figura 1.2.1. Rodamiento rígido de bolas



Figura 1.2.2. Rodamiento de agujas



Figura 1.2.3. Rodamiento de rodillos cónicos

### 3. Componentes de los rodamientos

Los rodamientos generalmente constan de los anillos (tanto exterior como interior), los elementos rodantes y la jaula.

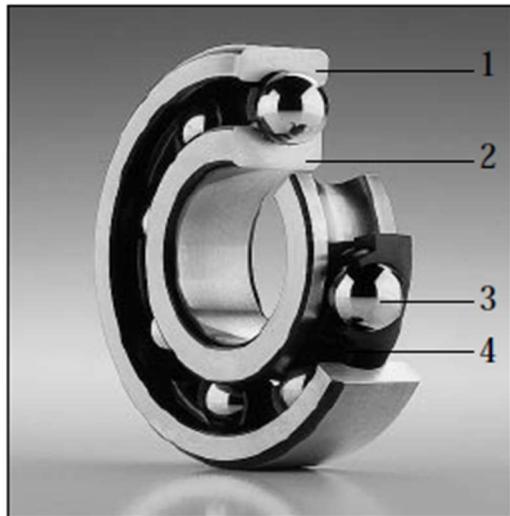


Figura 1.3.1; 1. Anillo exterior; 2. Anillo interior; 3. Elemento rodante; 4. Jaula

Las superficies de los anillos sobre las que ruedan los elementos rodantes se denominan pistas o caminos de rodadura mientras que la jaula mantiene los elementos rodantes dentro del rodamiento y los separa evitando que deslicen uno contra otro.

El lubricante aunque no es un componente en cuestión, también es una parte muy importante del rodamiento ya que sin él su funcionamiento sería imposible. El lubricante puede ser aceite o grasas.

#### • Elementos rodantes

Tienen como función transmitir la fuerza que actúa en el rodamiento entre el anillo interior y exterior. Para soportarla máxima capacidad de carga es necesario el mayor número de elementos rodantes, siendo su número y tamaño dependientes de la

sección transversal del rodamiento y que los elementos de rodadura sean lo más idéntico posible.

Se clasifican según su forma, en rodamientos de bolas o de rodillos (cilíndricos, de aguja, cónicos o de barril). También se pueden clasificar en grados (siendo la tolerancia de estos grados de carácter muy leve).

### • Anillos del rodamiento

Se encargan de guiar a los elementos rodantes en la dirección de rotación.

Los dos anillos del rodamiento son separables ya que se pueden montar por separado pero con un ajuste apretado (fuerza con la que se encuentra el rodamiento en el alojamiento)

Hay de dos tipos: separables, como por ejemplo rodamiento de rodillos cilíndricos, rodamientos axiales de bolas y rodamientos no separables, como por ejemplo rodamiento rígido de bolas, rodamientos de rodillos esféricos.

### • Jaula

#### - Funciones:

- Mantener los elementos rodantes a una distancia adecuada entre sí para evitar el contacto directo entre ellos, con el fin de conseguir la mínima fricción y generación de calor

- Mantener a los elementos rodantes distribuidos uniformemente alrededor de toda la circunferencia, con el fin de proporcionar una distribución uniforme de la carga y un funcionamiento silencioso y constante

- Guiar a los elementos rodantes en la zona no cargada, con el fin de mejorar las condiciones de rodadura del rodamiento y evitar movimientos deslizantes dañinos

- Si los rodamientos son de diseño separable, retener los elementos rodantes tras la retirada de uno de los aros del rodamiento durante su montaje o desmontaje.

- Ayudar en el guiado de los elementos rodantes



Figura 1.3.2

**- Proceso de fabricación:**

Se clasifican en jaulas prensadas, jaulas mecanizadas y jaulas moldeadas:

Las jaulas prensadas son hechas normalmente de acero o de latón y son más ligeras que las jaulas mecanizadas de metal, en una jaula prensada apenas se cierra la brecha entre ambos anillos, por tanto el lubricante entra fácilmente y se almacena en la jaula y pueden recibir un tratamiento de superficie destinado a mejorar el coeficiente de rozamiento.

Las jaulas mecanizadas son hechas normalmente de aleaciones de aluminio, bronce o de resina fenólica, estas jaulas se eligen para los rodamientos donde se producen pocas series, aunque alcanzan altos valores de resistencia.

Las jaulas moldeadas se realizan normalmente en material sintético siendo el material más empleado actualmente la poliamida 66 reforzada con fibra de vidrio ya que puede utilizarse a temperaturas de funcionamiento de hasta 120°C durante largos periodos de tiempo. Estas jaulas se producen por moldeo por inyección y se utilizan cuando se producen en grandes series. Entre sus características mecánicas más importantes se encuentran:

- Capacidad de carga muy elevados
- Elevada elasticidad
- Bajo peso
- Bajo coeficiente de rozamiento
- Buenas propiedades de funcionamiento en seco
- Buena resistencia a los golpes y vibraciones
- Buena calidad superficial

Los factores más importantes que influyen en el envejecimiento de la jaula son la temperatura de trabajo, el tiempo y los efectos químicos de ciertos lubricantes. Aquí se adjunta una tabla (Tabla 1.3.1) en la que se pueden ver las capacidades que presentan las diferentes tipos de jaulas en función del proceso de fabricación realizado:

	Jaula moldeada	Jaula embutida, chapa de acero o latón	Jaula mecanizada bronce	Jaula mecanizada resina fenólica
<b>Velocidad límite</b>	» La del rodamiento	» La del rodamiento	» Permite aumentar la velocidad límite del rodamiento	» Generalmente centrada en un anillo, permite aumentar la velocidad límite del rodamiento
<b>Temperatura</b>	» Poliamida 6/6: 120°C de continuo, 150°C a intervalos » otros materiales consultar a SNR	» No limita la temperatura de funcionamiento del rodamiento	» No limita la temperatura de funcionamiento del rodamiento	» 110°C máx. en utilización continua
<b>Lubricación</b>	» Buen coeficiente de rodamiento » Buen comportamiento en el caso de lubricación deficiente	» Contacto metal / metal, sensible por tanto a la lubricación	» Buen coeficiente de rodamiento bronce / metal	» Excelente coeficiente de rodamiento » Jaula impregnada de aceite, por lo que el rodamiento está óptimamente lubricado
<b>Comportamiento bajo vibraciones</b>	» Excelente comportamiento: - Ligereza, - Elasticidad	» Limitado por: - Resistencia mecánica, - Modo de ensamblaje, - Desequilibrio dinámico eventual	» Excelente aguantamiento » Mantiene el centrado pese a los desequilibrios dinámicos	» Buen comportamiento con jaula centrada sobre un anillo » Poca inercia » Buen equilibrado
<b>Aceleraciones y deceleraciones brutales</b>	» Excelente comportamiento: - Ligereza, - Elasticidad	» Riesgo de rotura de jaula	» Resistencia mecánica elevada pero: - Falta de flexibilidad, - Gran inercia	» Excelente comportamiento dadas: - Poca inercia, - Buena resistencia mecánica
<b>Defectos de alineamiento eje-alojamiento</b>	» Excelente comportamiento: Elasticidad	» Riesgo de rotura de jaula	» Utilización no recomendada	» Utilización no recomendada
<b>Observaciones</b>	» Jaula que reemplaza la jaula de chapa en numerosos tipos de rodamientos		» Coste elevado » Reservado generalmente a los rodamientos de gran velocidad y/o de alta precisión	» Coste elevado » Reservado generalmente a los rodamientos de gran velocidad y/o de alta precisión

Tabla 1.3.1

Por lo tanto, la adecuación de las jaulas de poliamida para una aplicación específica depende de las condiciones de funcionamiento y los requisitos de duración. Algunos medios son incluso más agresivos que los que aparecen en la tabla, un ejemplo típico es el amoniaco que se aplica como refrigerante en los compresores. En dichos casos, las jaulas hechas de poliamida 66 reforzada con fibra de vidrio no se deben utilizar a temperaturas de funcionamiento superiores a 70 °C.

También se puede establecer una temperatura de funcionamiento mínima, ya que la poliamida pierde su elasticidad lo que puede producir fallos en la jaula. Por este motivo, las jaulas hechas de poliamida 66 reforzada con fibra de vidrio no deben funcionar a una temperatura continua inferior a -40 °C.

A continuación se adjunta la tabla (Tabla 1.3.2) de la temperatura máxima admisible según el lubricante utilizado

Lubricante	Temperatura permisible de funcionamiento (°C)
<b>Aceites minerales</b>	
Aceites sin aditivos EP, p. ej.	120
aceites para maquinaria o hidráulicos	
Aceites con aditivos EP, p. ej.	110
aceites industriales y para cajas de cambios de automóviles	
Aceites con aditivos EP, p. ej.	100
aceites para ejes traseros y engranajes diferenciales (automoción), aceites para engranajes hipoides	
<b>Aceites sintéticos</b>	
Poliglicoles, polialfaolefinas	120
Diésteres, siliconas	110
Ésteres de fosfato	80
<b>Grasas</b>	
Grasas con base de litio	120
Grasas de poliurea, bentonita, con complejos de calcio	120

Tabla 1.3.2

**-Tipo de guía:**

- Guiado de los elementos de rodadura
- Guiado por el anillo interior
- Guiado por el anillo exterior

En la figura 1.3.3, se observa el tipo de guiado según con qué tipo de componente del rodamiento está en contacto.



Figura 1.3.3

La elección del guiado depende de los criterios de funcionamiento del rodamiento, es decir, en función de las vibraciones, variaciones de velocidades o velocidades máximas que debe soportar.

## 4. Rediseño de componentes metálicos a plásticos

Los procesos de transformación de plásticos son una constante situación de búsqueda del equilibrio térmico debido al intercambio de calor entre sus componentes. Este intercambio de calor se define como el paso de energía térmica desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura, siendo estas temperaturas:

- Temperatura en el interior del molde: 200-300 °C en función del material.
- Temperatura de los canales de refrigeración: ≈25°C, temperatura del refrigerante.
- Temperatura del molde: temperatura intermedia, con valor bajo.

### • Mecanismos de transferencia de calor

- **Conducción:** mecanismo de transferencia de energía térmica entre dos sistemas basado en el contacto directo de sus partículas, sin flujo de materia y tendiendo a igualar la temperatura de cuerpos en contacto.

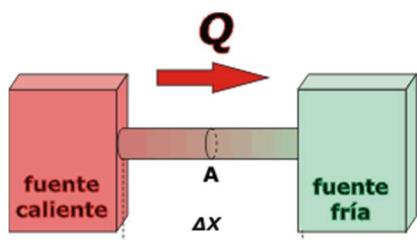


Figura 1.4.1

La fórmula matemática para el flujo de calor estacionario en una sola dirección es:

$$Q = K * A * \frac{\Delta T}{L}$$

- $Q$  = Caudal (cal/seg)
- $A$  = Área de contacto ( $m^2$ )
- $L (\Delta x)$  = Espesor de material (m)
- $K$  = Conductividad térmica (cal/m·K)
- $\Delta T$  = Diferencia de Temperatura (K)

- **Convección:** mecanismo de transferencia de calor que se produce por medio de un fluido (líquido o gas) que transporta el calor a través de zonas con diferentes temperaturas.

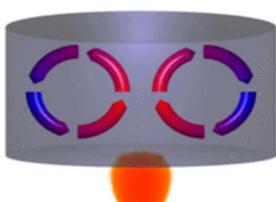


Figura 1.4.2

La fórmula matemática para la convección se expresa con la Ley de enfriamiento de Newton:

$$Q = h * A * \Delta T$$

-  $Q$  = Caudal (cal/seg)

-  $h$  = Coeficiente de convección (cal/m<sup>2</sup>·s·K)

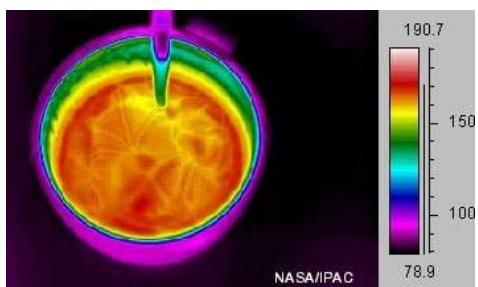
-  $\Delta T$  = Diferencia de Temperatura (K)

-  $A$  = Área del cuerpo con el fluido (m<sup>2</sup>)

- **Radiación:** mecanismo de transferencia de calor que no precisa de contacto entre la fuente de calor y el receptor, por tanto, no hay intercambio de masa ni se necesita medio material para que se transmita.

Se denomina radiación térmica, a la emitida por un cuerpo debido a su temperatura, siempre que esta es mayor a 0 °C se emite radiación electromagnética. Además, la radiación depende también del color del cuerpo, siendo el cuerpo negro un patrón ideal que absorbe toda la luz y la energía radiante que incide sobre él.

Así, la contribución de la radiación infrarroja, visible y ultravioleta a la radiación de un cuerpo negro a distintas temperaturas es mucho mayor en la radiación infrarroja, siendo esta la utilizada para observar las temperaturas de los distintos moldes.



En la figura 1.4.3, se puede observar un ejemplo de radiación infrarroja, vista con los diferentes colores según la temperatura a la que se encuentra, se puede observar como la zona con menor temperatura es el exterior del recipiente mientras que el interior está a la mayor temperatura.

Figura 1.4.3

En general, estos 3 mecanismos de transferencia de calor no se producen de manera individual sino que se combinan unos con otros, en el caso particular del proceso de inyección se encuentra:

- Un mecanismo de conducción, producido por el contacto directo entre el plástico y el molde, donde el plástico se enfriá y el molde se calienta.
- Un mecanismo de conducción, producido por contacto directo entre el circuito del molde y el refrigerante, donde las paredes del canal ceden calor y el refrigerante absorbe calor.
- Un mecanismo de convección, producido por un fluido (refrigerante) que es impulsado por una bomba, por tanto el refrigerante sacara el calor del molde y mediante un sistema de intercambio el refrigerante volverá a la temperatura de entrada.

Ahora se verán las propiedades que caracterizan a los mecanismos de transferencia de calor, hay que tener en cuenta que en cada propiedad termodinámica se va a diferenciar entre metales, termoplásticos amorfos y termoplásticos semicristalinos.

### • Conductividad

Indica la cantidad de flujo térmico que atraviesa una superficie determinada en sentido perpendicular a la misma, como consecuencia de la diferencia de temperatura a ambos lados, en otras palabras, es la capacidad de una sustancia de transferir el movimiento de sus moléculas a otras moléculas adyacentes o a sustancias con las que está en contacto.

La conductividad térmica de los materiales termoplásticos es de 300 a 1000 veces más bajo que en los metales, aunque en general se puede decir que los semicristalinos conducen más que los amorfos, como se puede observar en la tabla 1.4.1

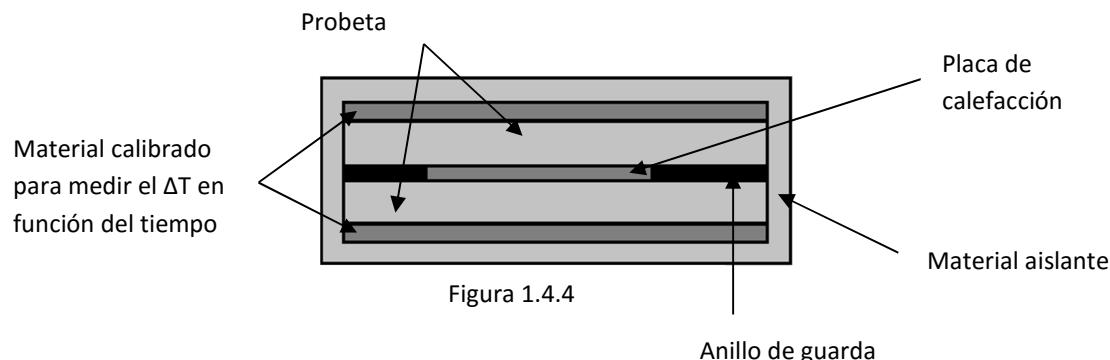
Material	Conductividad térmica W/(m·K)
<b>Metales</b>	
Aluminio	230
Cobre	390
Oro	315
Hierro	80
Plomo	35
<b>Plásticos amorfos</b>	
PC	0.187
PVC rígido	0.143
PS	0.130
<b>Plásticos semicristalinos</b>	
PA 66	0.245
PA6	0.245
LDPE (Polietileno de baja densidad)	0.331

Tabla 1.4.1

Esta diferencia se debe a que los metales tienen una estructura interna muy ordenada, en los termoplásticos semicristalinos es mas desordenada debido a que tienen regiones amorfas y cristalinas y en los termoplásticos amorfos las cadenas y moléculas del polímero se agrupan al azar, por tanto cualquier movimiento se transmite con mayor facilidad en los metales, ya que las moléculas están más cercanas entre si y es mucho más fácil transmitirse energía de movimiento unas a otras.

Al tener un carácter más aislante los plásticos, los hace favorables en un amplio rango de aplicaciones aunque el principal problema radica en la propia transformación de los mismos debido a su baja conductividad.

Para cuantificar el valor de la conductividad térmica de un material se utiliza un ensayo denominado ensayo de dos placas, consistente en determinar la cantidad de calor que se transmite a través de la muestra y en dirección perpendicular por unidad de área, midiéndose el gradiente de temperatura en el tiempo del material calibrado.



La conductividad térmica varía en función de ciertos parámetros, por ejemplo en función de la temperatura, cuanto mayor es la separación entre las moléculas mas afecta la temperatura, por tanto, el aumento de temperatura implica una disminución de la conductividad, esto provoca una separación de las moléculas, llegando a ser la máxima separación cuando alcanza la temperatura de fusión (Figura 1.4.5).

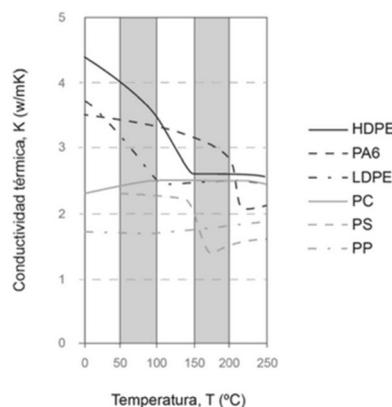


Figura 1.4.5

Respecto a esta propiedad termodinámica solo hay que tener una cosa en cuenta, y es que cuando se inyecta material en el molde, la parte que está en contacto con el molde se solidifica dando lugar a una capa fría, actuando como material aislante frente al material interior en estado fundido, por ello, la pieza se enfriará todo lo que su

conductividad permita aun con los canales refrigerantes capaces de extraer el calor para solidificar la pieza uniformemente.

Si se decide inyectar una pieza con algún aditivo como por ejemplo talco, para conseguir mayor conductividad y por tanto conseguir un enfriamiento más rápido de la pieza hay que tener en cuenta que pueden presentar el inconveniente de que se produzca un llenado incompleto o una compactación no efectiva, para solucionar esto basta con aumentar la temperatura de inyección o la temperatura del molde.

### • Calor específico ( $C_p$ )

Es la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia para elevar su temperatura en una unidad (Grado Celsius o Kelvin). Sus unidades de medida son los J/Kg·K.

Su fórmula para calcular el calor necesario es:  $Q = m * C_p * \Delta T$

El calor específico varía en función de diferentes parámetros, siendo uno de ellos la temperatura, en los termoplásticos hay una variación entre los termoplásticos amorfos y los semicristalinos ya que en los primeros hay un incremento progresivo del calor específico al ir aumentando la temperatura mientras que en los semicristalinos

alcanzan un valor máximo de calor específico correspondiente al calor de fusión necesario para fundir las regiones cristalinas del material para luego decrecer. Se trata de una energía extra denominada calor latente, necesario para fundir los cristales.

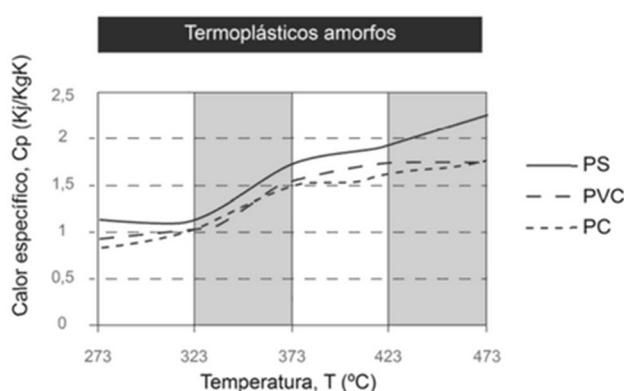


Figura 1.4.6

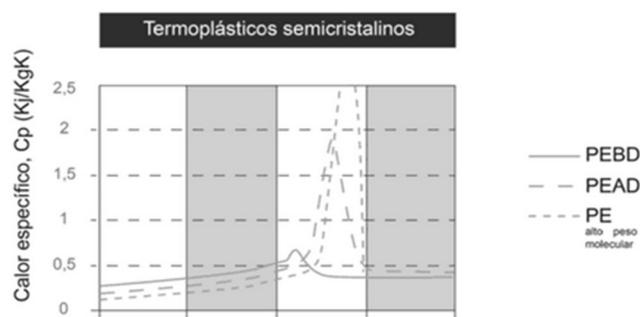


Figura 1.4.7

En la tabla 1.4.2 se muestran datos de calor específico y calor latente de los diferentes termoplásticos:

Material	Calor específico KJ/(K·kg)	Calor latente KJ/Kg
<b>Plásticos amorfos</b>		
PC (Policarbonato)	1.2	-
PVC (Policloruro de vinilo)	0.7	-
PS (Poliestireno)	1.2	-
<b>Plásticos semicristalinos</b>		
PA 66	2.2	130
PA6	2.2	130
HDPE (Polietileno de alta densidad) = PEAD	1.9	209
LDPE (Polietileno de baja densidad) = PEBD	1.9	209

Tabla 1.4.2

Como resumen de las dos propiedades vistas se pueden llegar a dos conclusiones, la conductividad cuanta más alta sea en un material significara que menor calor se debe disipar, mientras que cuanto más alto sea el calor específico, menor calor se concentra y por tanto, con mayor facilidad se evacuara.

Aunque el principal problema radica, cuando en dos materiales diferentes, la conductividad es mayor en un material y el calor específico es mayor en el otro material o viceversa, en ese caso al tener dos propiedades muy diferentes entre ellas se define una nueva propiedad llamada difusividad térmica, con ello se consigue tener un solo punto de vista

### • Difusividad térmica

Propiedad térmica necesaria para entender que material es más hábil para disipar la energía térmica y se define como:  $\alpha = \frac{k}{C_p * \rho}$

$$\alpha = \text{Difusividad térmica (m}^2/\text{s})$$

$$\rho = \text{densidad (kg/m}^3\text{)}$$

$$k = \text{Conductividad (W/(m·K))}$$

$$C_p = \text{Calor específico (J/Kg·K)}$$

Por tanto, cuanto mayor es la difusividad térmica, menor es el ciclo de enfriamiento ya que deberá disipar una menor cantidad de calor.

#### • Tiempo de refrigeración

Tiempo necesario para reducir el nivel de calor de un material y se rige por la siguiente fórmula matemática:

$$t_{\text{enfriamiento}} = \frac{\rho * s^2 * C_p}{6.08 * K}$$

Donde:

$t$  = tiempo (s)

$C_p$  = Calor específico (J/Kg·K)

$\rho$  = densidad (kg/m<sup>3</sup>)

$s$  = espesor (m)

$k$  = Conductividad (W/(m·K))

Como se puede observar en la ecuación, al aumentar  $C_p$ , se aumenta el tiempo de enfriamiento, mientras que al aumentar  $K$ , se disminuye el tiempo de enfriamiento. Aunque como aspecto más importante, se tiene al espesor, es un aspecto muy incidente en el tiempo de enfriamiento debido a que la realización de un espesor pequeño permite ahorrar costes de fabricación y costes de proceso, ya que el proceso de enfriamiento es el proceso más largo en la inyección de plásticos.

Por último, es necesario tener en cuenta que estas propiedades vistas anteriormente se cumplen tanto en plásticos como en todos los materiales, por eso, en el caso concreto del proceso de inyección, los materiales que intervienen son el propio polímero, el metal del molde y el fluido utilizado para refrigerar.

Por tanto, aparte de tener en cuenta el polímero utilizado, también es necesario conocer los otros dos materiales que intervienen, porque no es lo mismo utilizar aluminio o acero para el molde, ya que son metales con diferentes conductividades o el uso de unos metales postizos en el molde para refrigerar zonas donde no llegan los circuitos de refrigeración.

# Anexo 2: SolidWorks

1. Que es SolidWorks.....	59
2. Entorno de SolidWorks.....	60
· Modelado de piezas	
- Croquis	
- Operaciones	
· Ensamblaje	
3. Estudio “Jaula de alojamiento para rodamientos”.....	64
· Caso 1: Jaula original	
· Caso 2: Jaula con reducción de anchura de los travesaños	
· Caso 3: Ensamblaje entre jaula original y un refuerzo en el travesaño	

## 1. Que es Solidworks

Es un software CAD (Diseño asistido por computadora) para modelado mecánico de piezas en 3D que integra un gran número de funciones avanzadas para facilitar el modelado de piezas, crear grandes ensamblajes, generar planos y otras funciones que permiten gestionar proyectos de forma rápida y fiable.

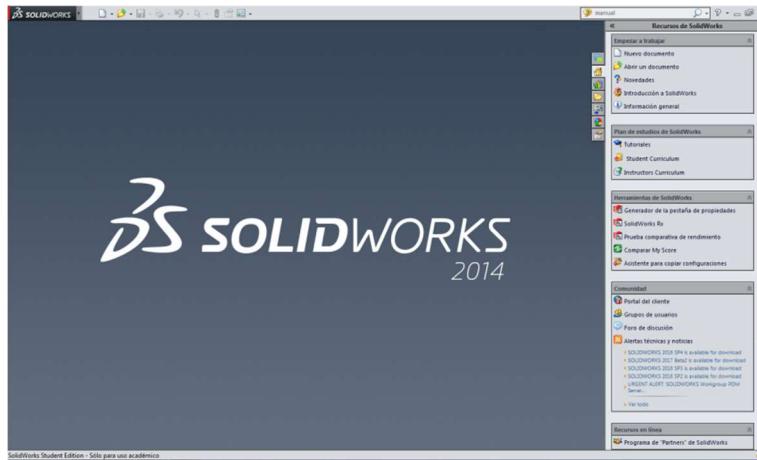


Figura 2.1.1

Se caracteriza por tener un entorno intuitivo y por disponer de herramientas de diseño fáciles de utilizar. Todo ello integrado en un único programa de diseño.

Además, gracias a las funciones geométricas inteligentes y el gestor de diseño que incorpora se permite visualizar, editar o eliminar cualquier operación realizada en una pieza en todos los documentos asociados, por tanto, sus principales características son las dimensiones (cotas) y las relaciones geométricas que definen un modelo tridimensional.

A la hora de construir un diseño 3D se exponen tres módulos: pieza, ensamblaje y dibujo (Figura 2.1.2).

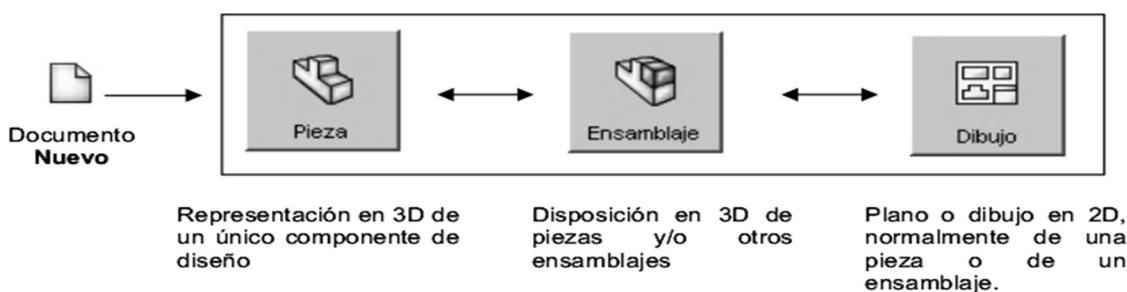


Figura 2.1.2

La creación de un documento en cada uno de ellos genera un fichero con distinta extensión, aunque todos los documentos están asociados y vinculados entre ellos.

## 2. Entorno de SolidWorks

El entorno de SolidWorks se divide principalmente en 4 partes:

- **Barra de menús:** situado en la parte superior de SolidWorks, contiene los botones utilizados con mayor frecuencia en la barra de herramientas estándar.
- **Barra de herramientas:** situado en la parte superior de la ventana de SolidWorks, justo debajo de la barra de menús. Los botones pertenecientes a ella son métodos abreviados de los comandos que se utilizan más a menudo para la realización de tareas de diseño específicas. La mayoría de las barras de herramientas aparecen de una manera por defecto, según la versión del programa, aunque pueden ser personalizados por el usuario para adaptarla a sus necesidades.
- **Gestor de diseño (FeatureManager):** situado a la izquierda de la ventana de SolidWorks, proporciona un esquema de la pieza, el ensamblaje o el dibujo activo. En él se incluyen de forma histórica las operaciones que han sido necesarias para conformar la pieza durante su diseño. Las operaciones recientes se encuentran al final del árbol mientras que las más antiguas son las primeras en aparecer, esto hace más fácil visualizar la construcción del modelo o ensamblaje.
- **Zona de gráficos:** zona donde se muestra y se permite manipular piezas, ensamblajes y dibujos, también permite visualizar los diferentes resultados de tensión, deformación u otros resultados sobre el modelo. Permite la visualización de más de un resultado al mismo tiempo permitiendo comparar dos resultados distintos.

A modo de visión, la interfaz de usuario de SolidWorks con las principales partes explicadas anteriormente quedaría como que reflejado en la figura 2.2.1

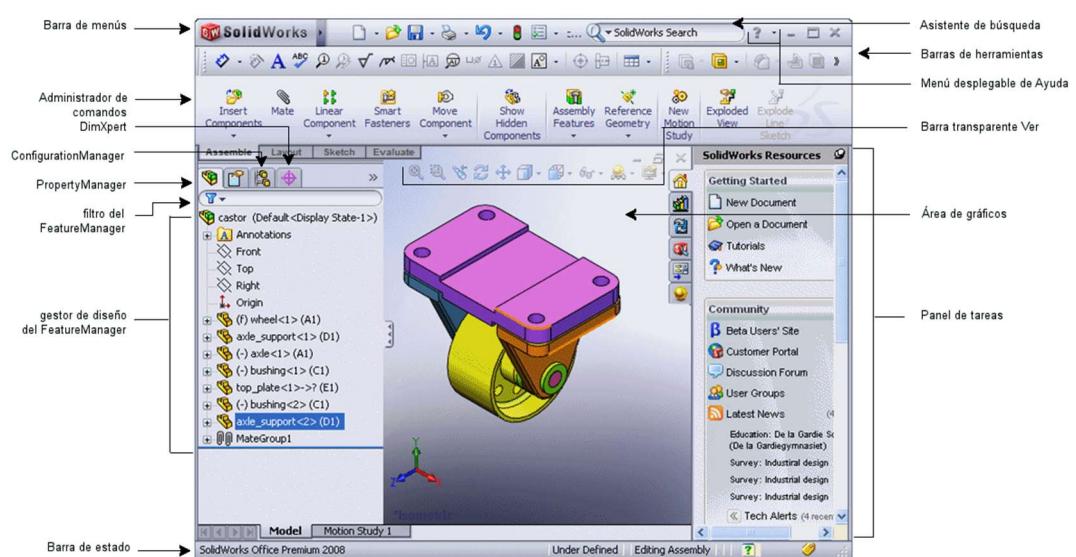


Figura 2.2.1

## • Modelado de piezas

### - Croquis

Para comenzar cualquier dibujo en 3D, primeramente se debe seleccionar el plano en el que se quiere trabajar. Se puede seleccionar un plano predeterminado, como el alzado, planta o vista lateral, son los planos principales del dibujo y vienen creados por defecto. Además de estos planos, se pueden crear planos auxiliares sobre referencias de piezas ya creadas.

Una vez elegido el plano, se comienza a realizar el croquis de la pieza, es el nombre utilizado por SolidWorks para describir un perfil 2D, para la elaboración de los croquis se tienen gran variedad de herramientas de dibujos como son líneas, rectángulos, círculos, splines, polígonos... (Figura 2.2.2)

Y evidentemente, multitud de operaciones para relacionar y modificar las figuras geométricas como son simetría, recortar, convertir... (Figura 2.2.2)

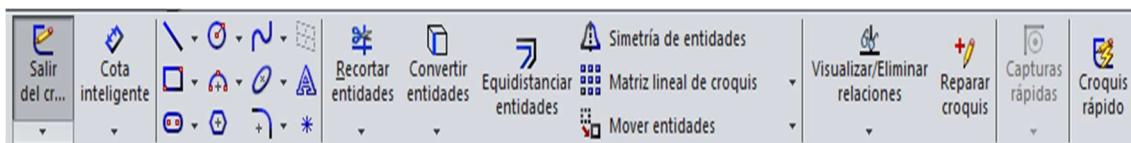


Figura 2.2.2

En todos las partes de las piezas que se dibujan, se realizan con valores conductores, es decir, tomando medidas aproximadas y después se van acotando todas las cotas hasta definir completamente el croquis mediante la herramienta cota inteligente, también se pueden ir realizando con el ratón a medida que vamos dibujando las distintas partes del croquis.

Como en todas las herramientas, hay unas reglas básicas para no cometer errores al croquizar:

- Los croquis no deben contener contornos autointercetados, es decir, no debe haber intersección de líneas (Figura 2.2.3).

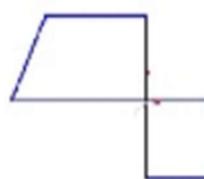
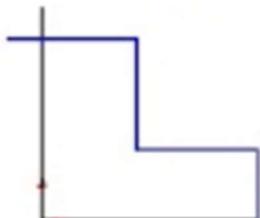


Figura 2.2.3

- El croquis no puede contener contornos desunidos en la primera operación de extrusión.



- Las esquinas de un croquis deberán ser completamente cerradas, por eso como se puede observar en la figura 2.2.4, no debe haber líneas que no confluyan en un punto definido en el plano.

Figura 2.2.4

## - Operaciones

A continuación se adjuntan dos figuras (Figura 2.2.5 y 2.2.10) con todas las operaciones posibles:

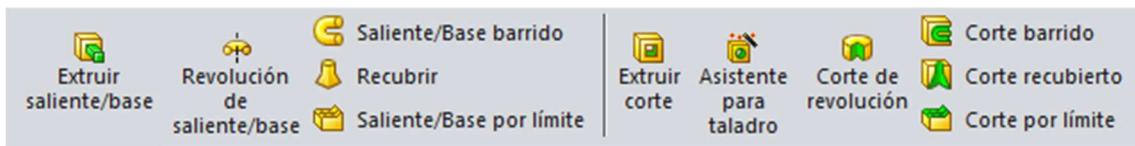


Figura 2.2.5

- **Extruir:** operación utilizada para extender el perfil de un croquis en una o dos direcciones como una operación sólida, es el paso de creación de un dibujo de 2D en 3D.

Una operación de extrusión puede agregar material a una pieza (en una base o saliente) o eliminar material de una pieza (en un corte o taladro).

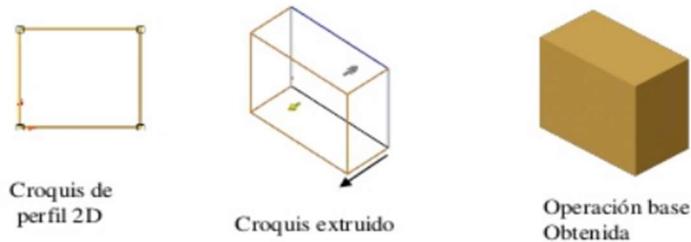


Figura 2.2.6

- **Barrido:** operación utilizada para crear un sólido con la geometría de un boceto 2D a través de un recorrido (Figura 2.2.7 y Figura 2.2.8). Para una operación de barrido el perfil puede permanecer abierto aunque en el trayecto no se pueden entrecruzar líneas.

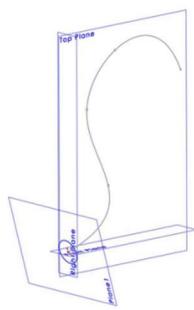


Figura 2.2.7



Figura 2.2.8

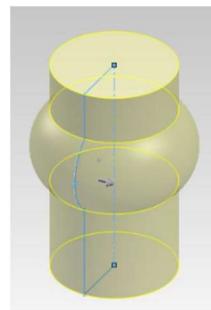


Figura 2.2.9

- **Revolución:** operación utilizada para revolucionar un croquis 2D alrededor de un eje o una línea constructiva, se pueden crear revoluciones de saliente base, de superficie o corte de revolución (Figura 2.2.9).

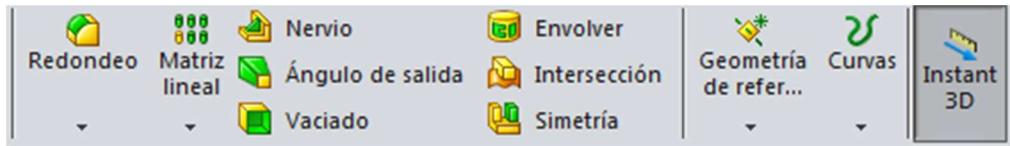


Figura 2.2.10

- **Redondeo:** operación que permite crear curvaturas en las aristas de las caras de objetos sólidos.
- **Matriz:** operación que sirve para crear instancias de una o más operaciones que se pueden separar de manera uniforme a lo largo de uno o dos trayectos lineales. Las matrices pueden ser lineales, circulares, conducidas por curva...
- **Vaciado:** operación utilizada para eliminar material de una pared del sólido para crear una sección hueca con un grosor de lámina en borde.
- **Simetría:** operación utilizada para crear una copia de una o varias operaciones a las que se le ha aplicado simetría con respecto a una cara o un plano.

### • Ensamblaje

Los ensamblajes se crean agregando y orientando piezas existentes, estas piezas son piezas de componente y se orientan y se posicionan mediante relaciones de posición. Las relaciones de posición relacionan caras/aristas de piezas de componentes con planos y otras caras/aristas.

Las etapas más importantes del proceso son:

- Creación de un nuevo ensamblaje: se utiliza el mismo método que en las piezas nuevas.
- Agregar el primer componente: los componentes pueden colocarse desde una ventana de pieza abierta o abrirse desde un examinador estándar.
- Posición del primer componente: el componente inicial se fija automáticamente al agregarse, el resto de componentes se posicionan después de agregarse.
- Establecimiento de relaciones de posición: se utilizan para colocar y orientar componentes respecto a si mismos, las relaciones de posición eliminan grados de libertad de los componentes, permitiendo el ensamblaje de todas las piezas que se desean.

### 3. Estudio “Jaula de alojamiento para rodamientos”

#### • Caso 1: Jaula original

- **Paso 1:** En primer lugar se procede a la creación de un nuevo documento mediante el módulo pieza, desde allí se llega a un área de dibujo en la que se selecciona un plano (se ha comenzado seleccionando el plano del alzado) para dibujar el croquis inicial de la figura 2.3.1 con sus respectivas dimensiones y se procede a realizar una revolución en torno al eje para conseguir una pieza simétrica.

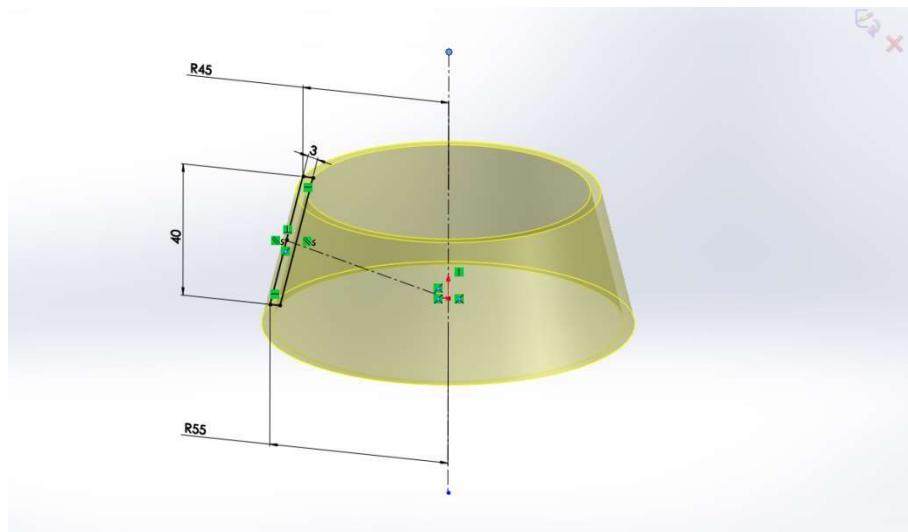


Figura 2.3.1

- **Paso 2:** A continuación, se realiza un croquis nuevamente en el alzado, con las dimensiones de los “agujeros” de la jaula vistos en la figura 2.3.2. Después, al estar el croquis en el centro de la pieza se extruye un corte sobre el plano medio de la revolución creada anteriormente.

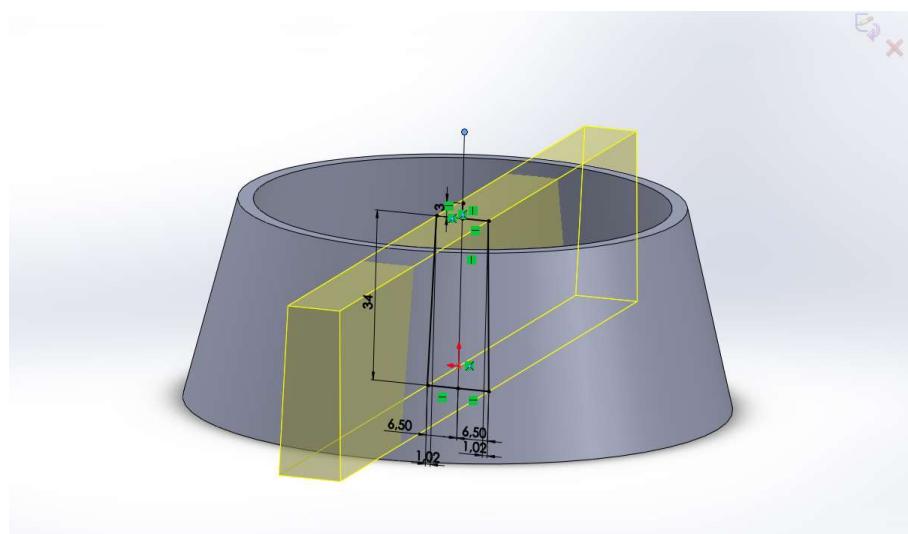


Figura 2.3.2

- **Paso 3:** Para no repetir la creación de “agujeros” mediante la extrusión, se realiza mediante la función matriz circular a lo largo de la revolución de la pieza, estableciendo el eje central de la pieza, la operación a repetir y la dimensión que cubrir, en el caso concreto de este estudio se realiza en toda la circunferencia, es decir, en los 360 grados, para completar la operación elegiremos un numero de travesaños, en concreto 20.

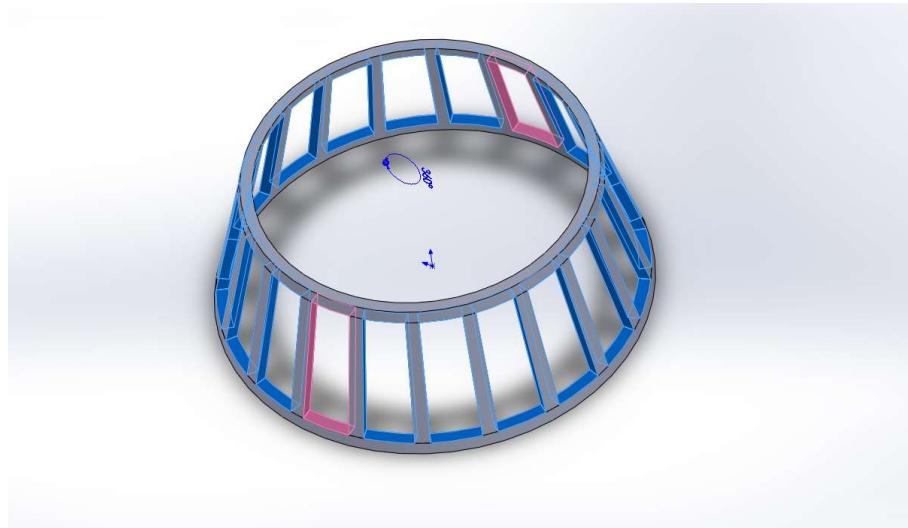


Figura 2.3.3

También, se puede observar la anchura/altura de los travesaños, ya que a posteriori se harán modificaciones sobre ello.

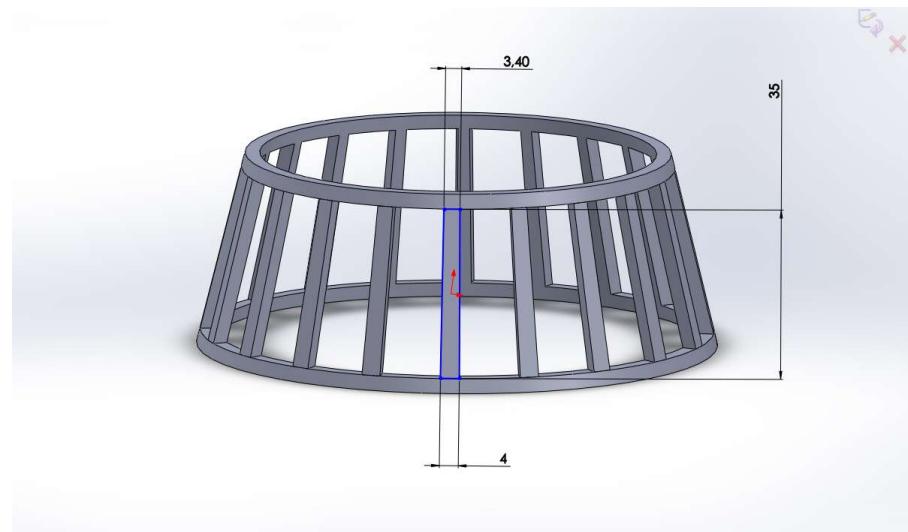


Figura 2.3.4

- **Paso 4:** Una vez creados los “agujeros” de la jaula, para diferenciar los travesaños de los anillos superior e inferior se debe crear un plano respecto a la inclinación de la pieza (Figura 2.3.5) consiguiendo con ello poder, si se quisiera, ensamblar piezas complementarias a los travesaños. Para realizar este paso, se selecciona el plano con unas dimensiones arbitrarias.



Figura 2.3.5

- **Paso 5:** A continuacion, se realiza un croquis en el plano seleccionado anteriormente, el croquis tendra las dimensiones de ancho y alto igual al tamaño de los travesaños de la jaula, para poder individualizar las dos partes (travesaños y aros superior e inferior).

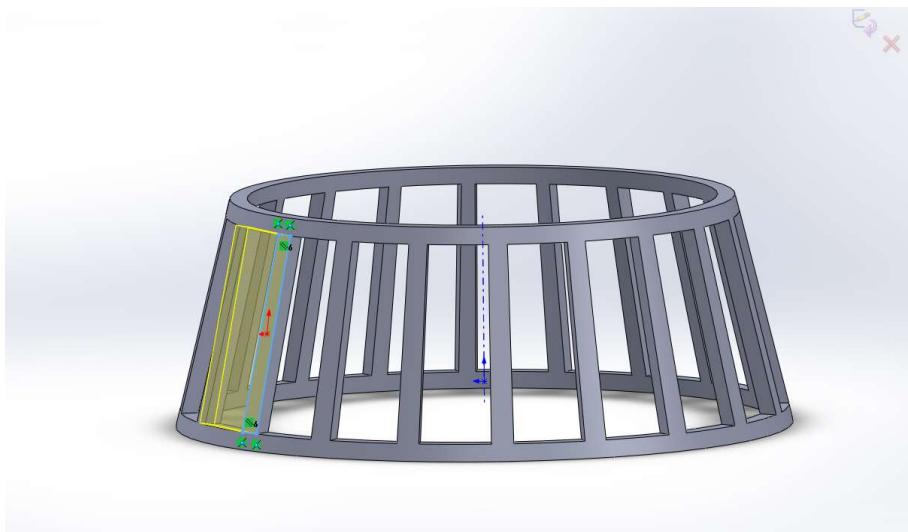


Figura 2.3.6

- **Paso 6:** Por último, para individualizar cada uno de los travesaños de una sola vez, se usa la función matriz circular estableciendo el eje central de la pieza, la operación a repetir y la dimensión que cubrir, en el caso concreto de este estudio se realiza en toda la circunferencia, es decir, en los 360 grados.



Figura 2.3.7

Para los dos siguientes casos, se explicara únicamente la parte de la metodología nueva respecto al caso anterior

#### • Caso 2: Jaula con reducción de anchura de los travesaños

Por tanto, para el segundo caso lo único que se va a realizar de diferente es la realización de los travesaños de menor anchura (Figura 2.3.8), para ello lo único que hacemos es aumentar dos travesaños en la jaula (22, en total) mediante la matriz circular. Quedando los demás pasos de manera igual.

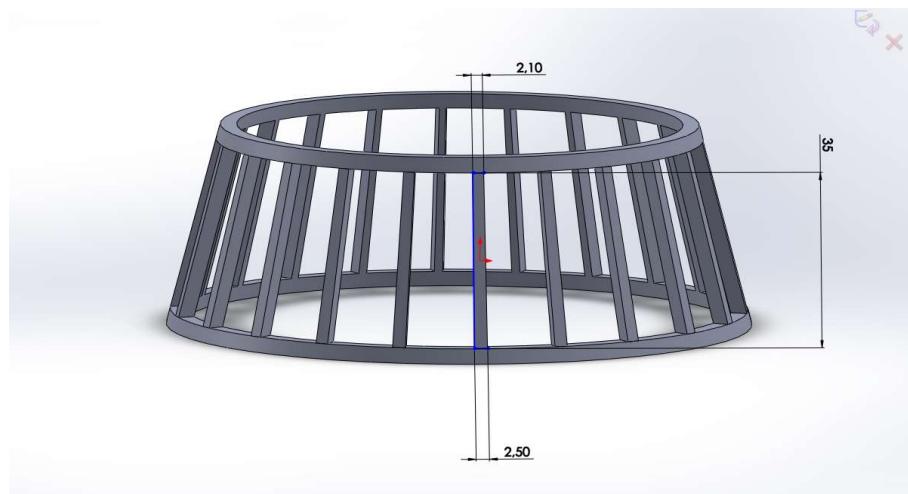


Figura 2.3.8

### • Caso 3: Ensamblaje entre jaula original y un refuerzo de travesaño

Por último, para el 3 caso el procedimiento será completamente igual que en el primer caso, pero después de todos los pasos se procederá al ensamblaje de la jaula con el refuerzo. Primeramente, se explicara cómo se realiza el refuerzo y después se explicara cómo se realizará el ensamblaje si se quiere formar un conjunto independiente.

- **Paso 1:** Se realiza el croquis de la pieza sobre el alzado, como será el refuerzo sobre los travesaños de la jaula, las medidas deben ser las mismas (Figura 2.3.9), después se realizará una extrusión del croquis con un grosor específico (1,5 mm).

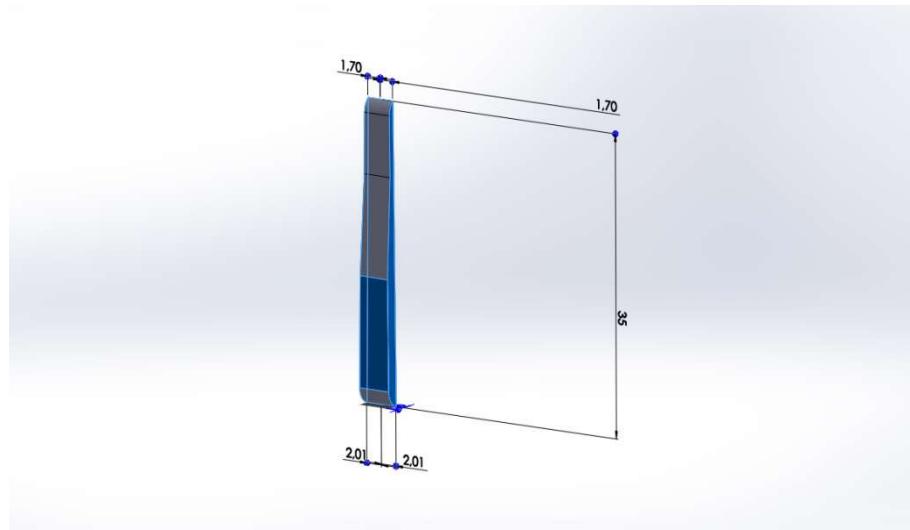


Figura 2.3.9

- **Paso 2:** A continuación, para darle la forma adecuada a la pieza, se extruye un corte sobre el croquis realizado con las dimensiones de la figura 2.3.10.

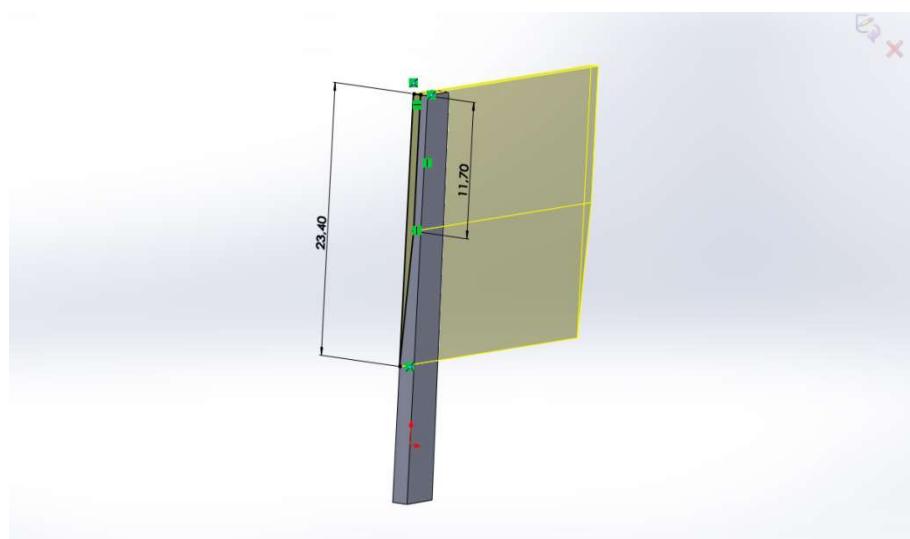


Figura 2.3.10

- **Paso 3:** El último proceso que se va a realizar serán 2 redondeos en las aristas inferior y superior de la pieza para evitar los ángulos rectos, los radios de redondeo serán de 1 mm en ambas partes.

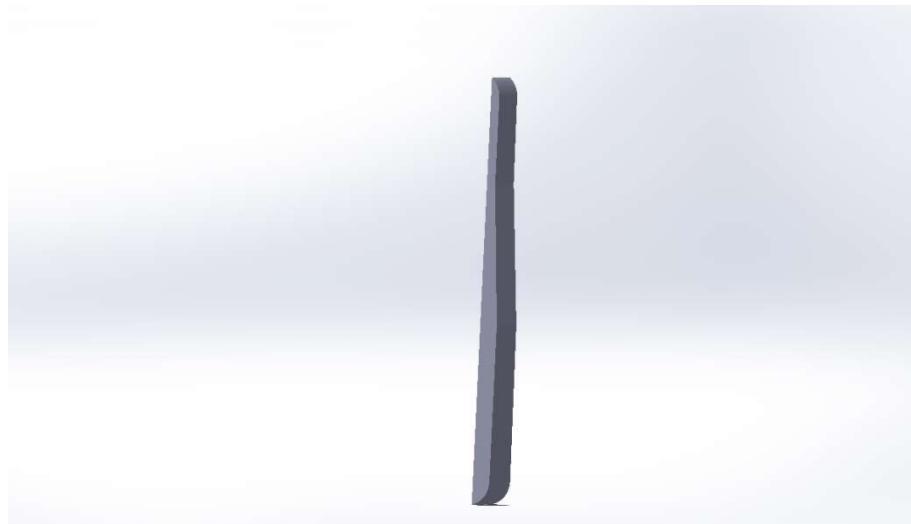


Figura 2.3.11

- **Paso 4:** Se procede a realizar el ensamblaje, para ello se insertaran los dos componentes que lo forman, la jaula y el refuerzo. Para una unión perfecta se deciden dos relaciones de posición, la unión de las caras seleccionadas en azul en la figura 2.3.12 y la unión de los vértices seleccionados en la figura 2.3.13, haciendo ambas relaciones de posición coincidentes para que se solapen ambos componentes.

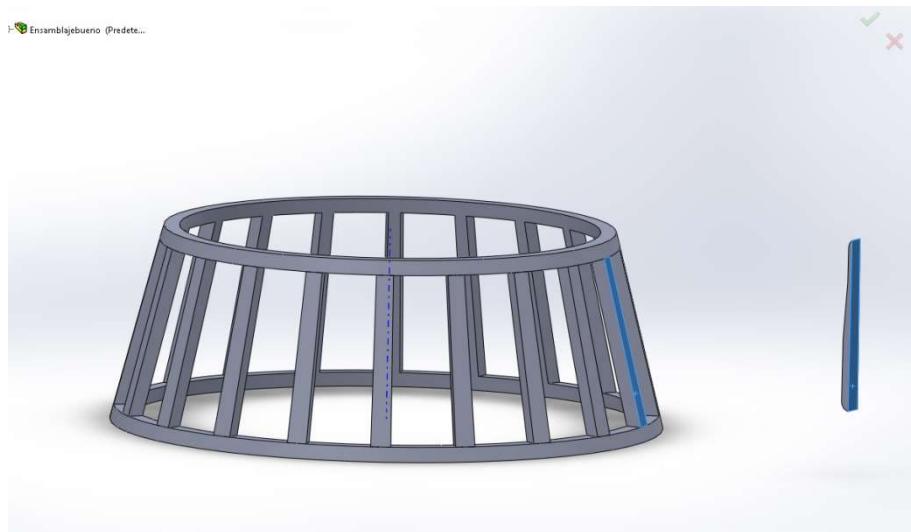


Figura 2.3.12



Figura 2.3.13

Antes de llegar a la solución final indicada en la figura 2.3.14, donde se puede observar la coincidencia entre ambos componentes, se realiza mediante matriz de componentes circular el ensamblaje de cada uno de los refuerzos con su travesaño respectivo.

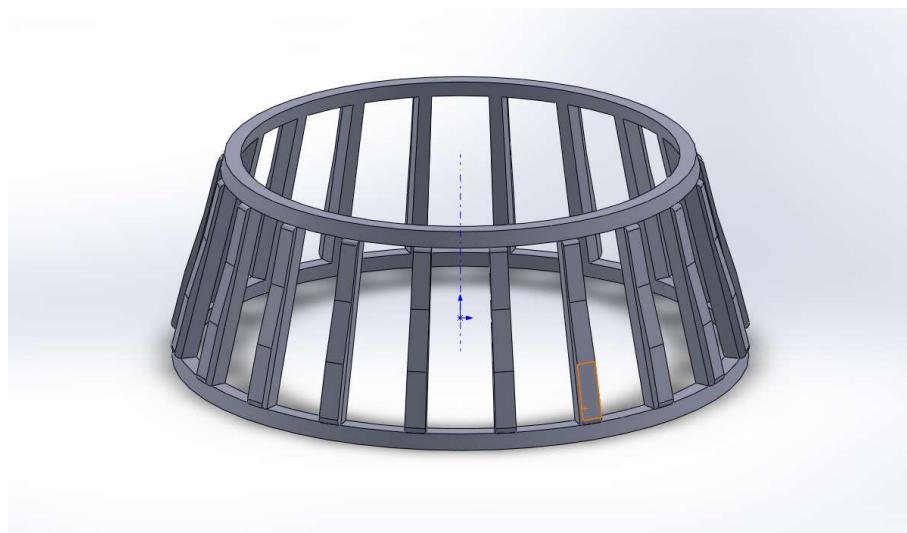


Figura 2.3.14

Por el contrario, para este último caso, si se quiere formar una única pieza y no un ensamblaje como se ha explicado anteriormente se procederá de la siguiente manera:

- **Paso 1:** Sobre la jaula original creada en el caso 1, se procederá a crear un plano de referencia sobre uno de los travesaños a los que se le va a aplicar el refuerzo. A partir de este plano se procederá a crear la figura de extrusión con una profundidad de 1.5 mm (longitud máxima que medirá el refuerzo).

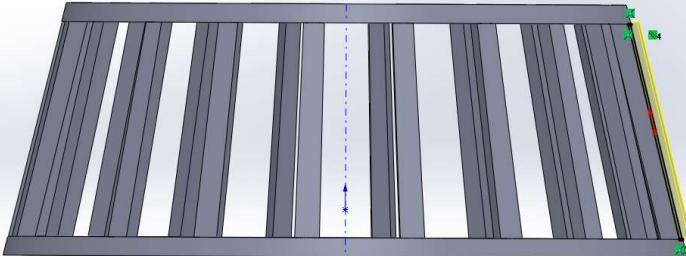


Figura 2.3.15

- **Paso 2:** Ahora se da la forma requerida al refuerzo mediante un corte al croquis realizado con sus dimensiones, como se observa en la figura 2.3.16 y luego se aplica un redondeo de 1 mm tanto en la parte superior como inferior para evitar los ángulos de 90 grados.

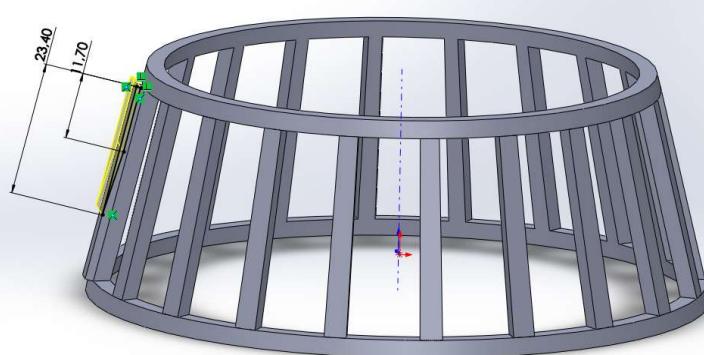


Figura 2.3.16

- **Paso 3:** Por último, para repetir la operación en cada travesaño, se usa la función matriz circular estableciendo el eje central de la pieza, la operación a repetir y la dimensión que cubrir, en el caso concreto de este estudio se realiza en toda la circunferencia, es decir, en los 360 grados (Figura 2.3.14).

Como se ha visto, se han realizado tres estudios de jaula de alojamiento para rodamientos, se ha hecho para a posteriori, saber cuál de ellas, con un mismo material puede soportar mejor las deformaciones y tensiones producidas en el proceso de fabricación.

# Anexo 3: Moldflow

1. Que es Moldflow.....	73
2. Geometría de la pieza.....	76
3. Material empleado.....	78
4. Ciclo de inyección y sus fases.....	80
· Dosificación	
· Llenado	
· Compactación o mantenimiento	
· Solidificación y enfriamiento	
5. Resultados principales.....	84
· Explicación general de cada resultado	
· Resultados ejemplificados para jaula original (caso 1)	
· Resultados ejemplificados para jaula con reducción de anchura de los travesaños (caso 2)	
· Resultados ejemplificados para ensamblaje entre jaula original y un refuerzo en el travesaño (caso 3)	

## 1. Que es Moldflow

Moldflow es un programa computacional, con el cual se puede simular el flujo de un polímero en un molde por medio de la técnica de moldeo por inyección. Se basa a partir de la discretización en elementos finitos de la geometría, es por ello una aproximación y se deben saber interpretar sus resultados.

Con este programa no tenemos una solución al problema, sino un punto de diagnóstico, tanto más exacto cuanto mayor sea el nivel de conocimiento del proceso, para poder elegir en concordancia.

El software cuenta con tres bloques básicos:

- **Pre-procesado:** se introducen todos los datos necesarios para el cálculo, siendo estos datos de 3 tipos:

- Geometría de la pieza con sus respectivos canales de alimentación, refrigeración... que se colocan externos a la pieza.
- Datos del material (generalmente los cogemos de la base de datos), aunque también se pueden establecer si estos no existen.
- Condiciones de proceso que hay que incluir para cada cálculo.

Este bloque se puede realizar tanto en el programa como importándolo desde un programa de dibujo 3D como SolidWorks.

- **Cálculo:** es el bloque propio del programa, en este caso, es donde se introduce la malla de la pieza, puede ser Dual Domain o 3D, diferenciándose cada uno de ellas en el número de elementos que componen la malla, en Dual Domain la malla está formada por elementos triangulares realizando un mallado mediante capas a través del espesor de la pieza mientras que en una malla 3D, la malla está formada por elementos tetraédricos, por tanto, tiene un mayor número de elementos en la malla.

- **Post-procesado:** una vez introducido todos los datos anteriores, estos nos proporcionan unos resultados, tanto en forma numérica como gráfica, los cuales se deben interpretar y sacar una conclusión acerca de ellos.



Figura 3.1.1

## Pasos en la construcción de un modelo:

- **Primer paso:** construcción de la geometría mediante los diferentes recursos que nos proporciona el programa o la importación de la geometría mediante un programa de diseño 3D.



Figura 3.1.2

- **Segundo paso:** creación de la malla con un tamaño de malla adecuado, el programa por defecto asigna un valor concreto, que puede ser modificado si se desea. Esta creación se puede realizar tanto en Dual Domain como en 3D, una vez que termina la creación de la malla, se dice el número de elementos de los que está formado, siendo más precisa cuantos más tenga. Aunque no siempre es conveniente hacerlo con muchos elementos si la pieza a trabajar no necesita de mucha precisión ya que el tiempo de estudio se aumentaría en exceso consumiendo recursos innecesarios

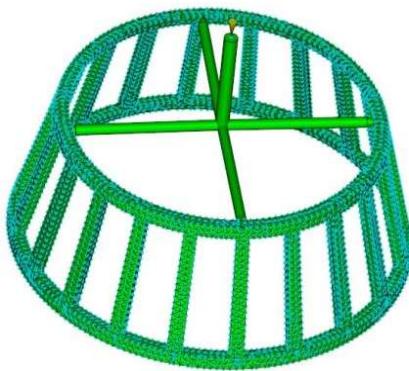
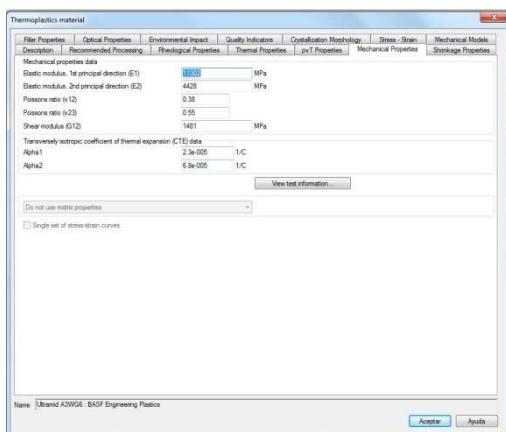


Figura 3.1.3

- **Tercer paso:** establecer el modo de operación, es decir, antes de analizar los resultados se debe acordar cuales deben aparecer. Puede ser llenado, llenado + compactación, llenado + compactación + refrigeración + deformación, llenado + compactación + deformación...



- **Cuarto paso:** acudir a la biblioteca de materiales y escoger el material correspondiente a la pieza real que se vaya a fabricar con posterioridad, pudiendo observar las diferentes características con las que cuenta cada uno, como características mecánicas o propiedades térmicas.

Figura 3.1.4

- **Quinto paso:** realizar los puntos de inyección en la pieza final, tantos como se deseen, pueden ser realizados directamente sobre la pieza, como en el caso de la figura 3.1.5 o sobre canales de refrigeración que se habrían creado con anterioridad, cuando se hace por este último método se suele establecer un punto de inyección únicamente.

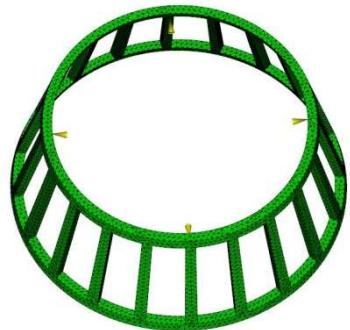


Figura 3.1.5

- **Sexto paso:** establecer los ajustes del proceso, entre los que se encuentra el tiempo de inyección o el porcentaje de llenado de la pieza.

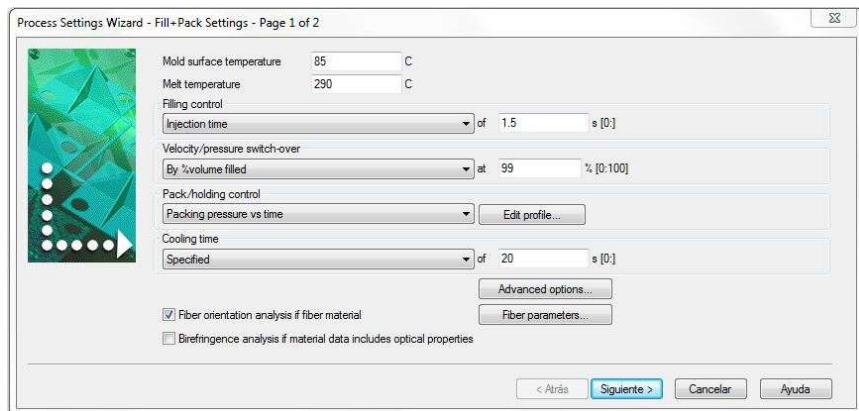


Figura 3.1.6

Si se han realizado todos los pasos anteriores correctamente en el programa aparecerá un tic verde en cada uno de los pasos, lo que conllevaría poder analizar la pieza satisfactoriamente, como muestra la figura 3.1.7.



Figura 3.1.7

## 2. Geometría de la pieza

Las jaulas están formadas básicamente por dos anillos (interior y exterior) y los travesaños verticales cuyas funciones principales son, a grandes rasgos, separar los elementos rodantes, mantener la separación radial entre ellos y evitar que puedan salirse los elementos rodantes cuando el rodamiento no está en funcionamiento.

Por otra parte, lo que se consigue con una jaula es evitar el deslizamiento de los elementos rodantes con los anillos interiores y exteriores del rodamiento, por tanto se evitan abolladuras u otro tipo de defectos en los elementos rodantes.

En el caso de las piezas estudiadas, hay 3 tipos caracterizándose básicamente por:

- Pieza 1: Jaula original con 20 travesaños.
- Pieza 2: Jaula realizada con una anchura menor en los travesaños respecto a la original (22 travesaños).
- Pieza 3: Ensamblaje entre jaula original y un refuerzo en cada travesaño.

La pieza 2 se ha diseñado de esa manera porque gracias a un menor espesor, se consigue una mejor lubricación del rodamiento y una mayor capacidad de carga al contar con mayor número de rodamientos en su interior, el inconveniente será ver la resistencia que tienen los travesaños y si se produce un llenado uniforme.

Con la pieza 3, lo que se quiere mejorar es la parte más débil de la jaula, consiguiendo poner una pieza auxiliar a los travesaños, se quiere obtener una mayor resistencia y una menor deformación de la pieza.

Una vez discutidos los 3 casos, se podrá ver que jaula actúa mejor ante el mismo material y las mismas fuerzas aplicadas.

A continuación, se adjuntan unas imágenes en las que se pueden ver las dimensiones principales de las piezas:

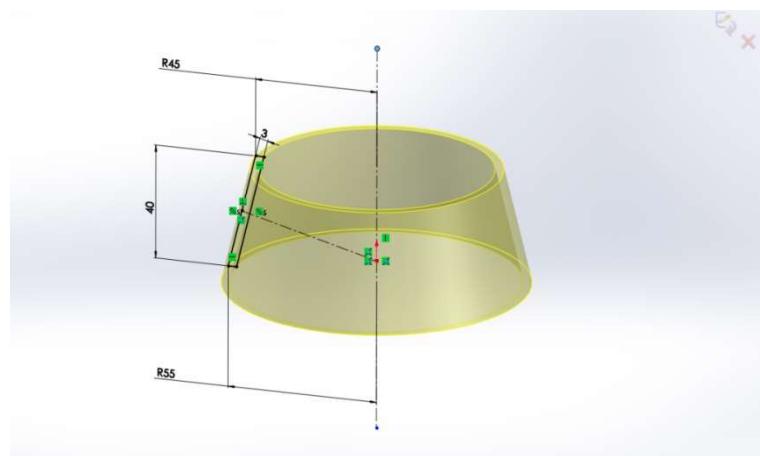


Figura 3.2.1

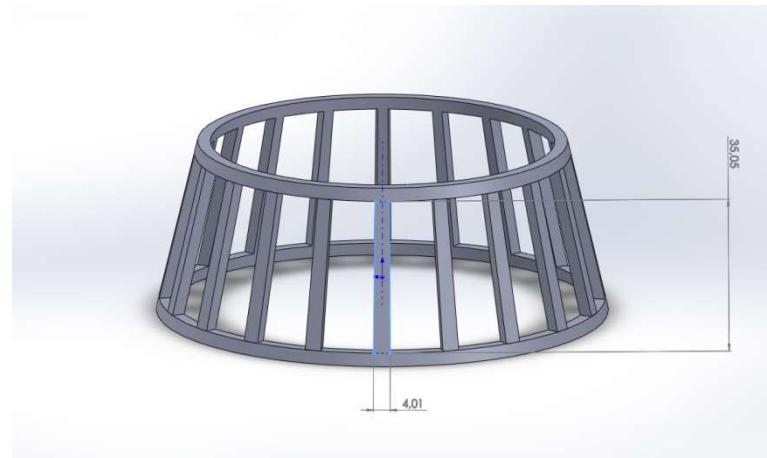


Figura 3.2.2

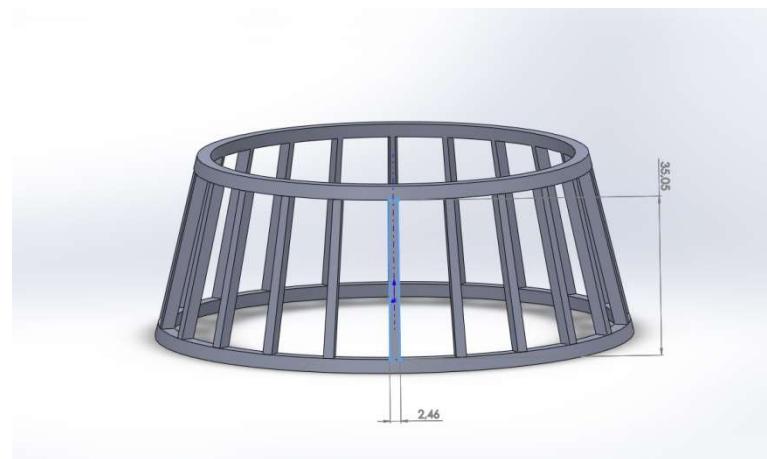


Figura 3.2.3

Como se puede ver en la figura 3.2.1 son dimensiones de la jaula para todas las piezas, mientras que la figura 3.2.2 es el tamaño de los travesaños en la jaula original y el ensamblaje y en la figura 3.2.3 es el tamaño de los travesaños reducidos en la jaula original. Por último, en la figura 3.2.4 se observa la longitud del canal de alimentación que se pone en el interior de las jaulas para realizar el moldeo por inyección.

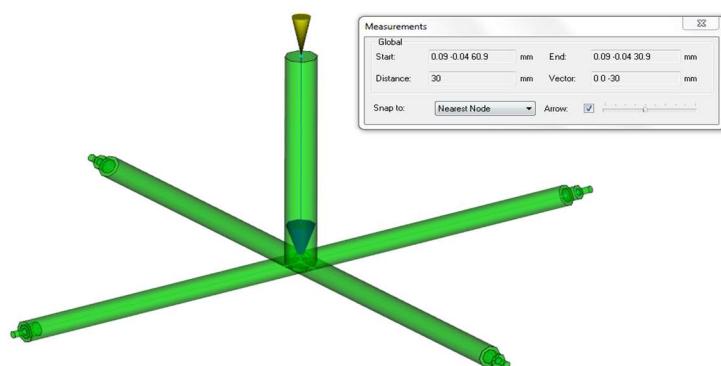


Figura 3.2.4

### 3. Material empleado

El material elegido ha sido una Ultramid A3WG6, que es una poliamida 66 con un 30% de fibra de vidrio, este material proviene del Ultramid A3W, cuya única diferencia es la adición de fibra de vidrio.

La PA 66 es un material termoplástico semicristalino que se encuentra dentro de los materiales sintéticos, posee una elevada resistencia mecánica, tenacidad y resistencia al impacto, buen comportamiento al deslizamiento y buena resistencia al desgaste. El material termoplástico puede ser moldeado, por medio de altas temperaturas sin pérdida o descomposición química u otros cambios negativos.

Se llaman poliamidas, debido a los característicos grupos amida en la cadena principal. Estos grupos amida son muy polares y pueden unirse entre sí mediante enlaces por puente de hidrógeno. Debido a eso y a que la cadena es tan regular y simétrica, las poliamidas son a menudo cristalinas y forman excelentes fibras.

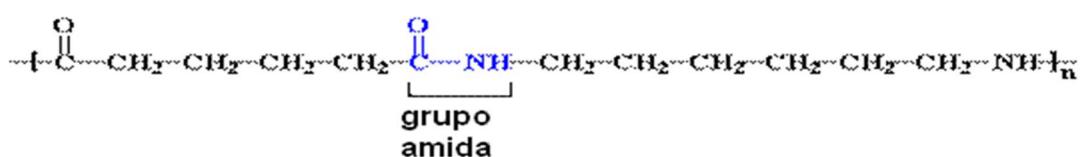


Figura 3.3.1

La PA 66 se llama así porque cada unidad repetitiva de la cadena polimérica, tiene dos extensiones de átomos de carbono, cada uno con una longitud de seis átomos de carbono.

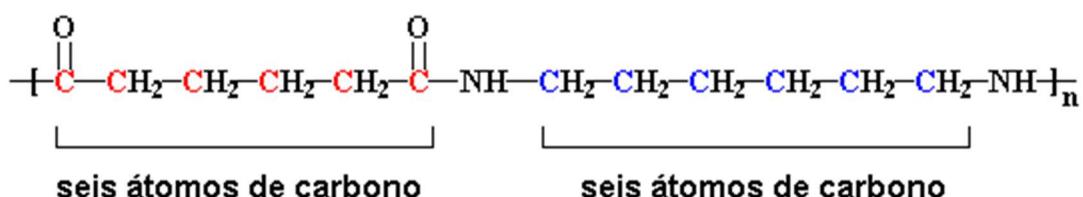
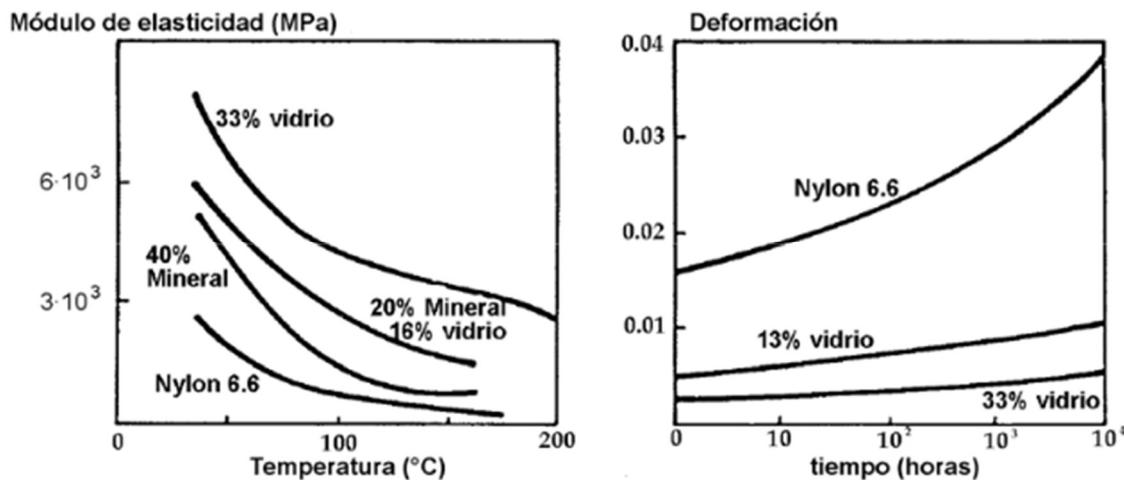


Figura 3.3.2

La adición de fibra de vidrio conduce a la poliamida a incrementos importantes de la resistencia, de la rigidez o de la estabilidad dimensional. En el caso de la PA 66 no se obtiene perdida de resistencia al impacto, aunque el alargamiento a la rotura se reduce sustancialmente. El color característico de PA 66 reforzado con fibra de vidrio es negro.

A continuación se expone mediante la gráfica 3.3.1cómo afecta a las propiedades más significativas de la PA 66 la adición de fibra de vidrio:



Gráfica 3.3.1

En el caso del material elegido, la poliamida con fibra de vidrio Ultramid A3WG6, tiene un módulo de Young de 11300 MPa, calculado mediante ensayos, individualmente el módulo de Young de la poliamida Ultramid A3W tiene 3100 MPa y la fibra de vidrio de 72000 MPa.

Entre las aplicaciones más importantes se encuentran piezas de automóviles de motor, engranajes o maquinaria para empresas papeleras. Por último, comentar en forma de tabla las distintas características a modo comparativo de PA 66 y PA 66 GF 30:

Características	PA 66	PA 66 GF 30	Prueba de ensayo
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.15	1.36	ISO 1183
Resistencia a la rotura por alargamiento (%)	35-40	5-7	-
Módulo de elasticidad a tracción (MPa)	3200-3400	6000-7000	ISO 178
Conductividad térmica (W/K*m)	0.24-0.27	0.28-0.3	-
Coeficiente por fricción	0.35-0.4	0.45-0.5	-
Temperatura de fusión (°C)	250	260	ISO 3146
Dureza Brinell-por penetración de bola (MPa)	170	270	-
Temperatura máxima utilización continua (°C)	100-105	115-120	-
Temperatura mínima utilización continua (°C)	-30	-20	-
Absorción de humedad (%)	8	5.5	ISO 62

Tabla 3.3.1

## 4. Ciclo de inyección y sus fases

La inyección, es un proceso adecuado para la obtención de piezas plásticas en grandes series, su gran ventaja es que la materia prima se transforma en un producto acabado en un solo paso, por tanto, necesita poco o ningún trabajo sobre la pieza obtenida. Es un proceso totalmente automatizable y con una calidad alta en las piezas acabadas.

Como principales parámetros que se han de tener en cuenta a la hora del proceso:

- Dimensiones de la pieza: tienen que ser reproducibles.
- Propiedades mecánicas: deberá resistir las condiciones de uso durante un tiempo de vida largo.
- Peso de la pieza: está relacionado con sus propiedades.
- Tiempo de ciclo: necesario para aumentar la producción, minimizando el tiempo de cada pieza.

En todo proceso de inyección, es importante conocer las fases que forman parte de este proceso y en qué consiste cada una, aunque antes se deben describir los espacios en que estos cambios tienen lugar.

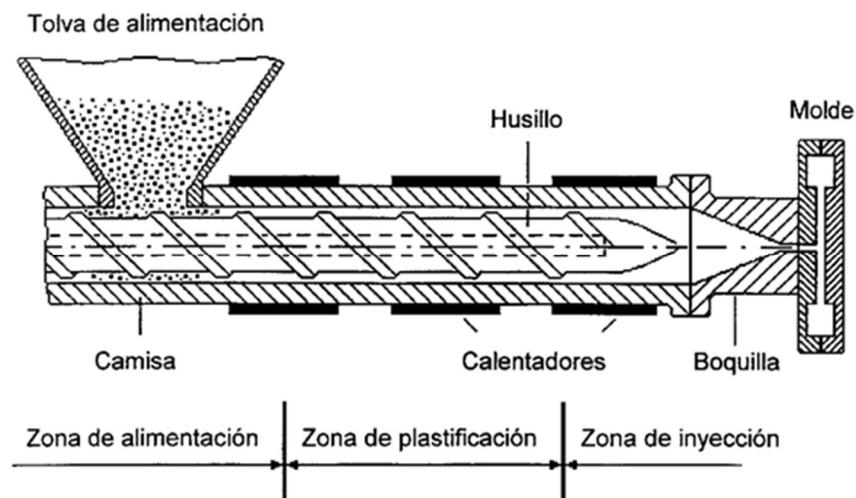


Figura 3.4.1

- Tolva de alimentación: punto de entrada del material, en esta la granza está en condiciones de presión y temperatura ambiente.
- Husillo: componente principal donde se realizan las funciones ligadas a sus dos movimientos (movimiento de rotación – se realiza el trabajo de plastificación; movimiento de traslación – provoca la transferencia del material fundido desde la parte delantera al molde).

- Camisa y calentadores (cámara de plastificación): cilindro calefactado mediante calentadores donde el material se transforma pasando de estado sólido a fundido para facilitar su transferencia.

En todo proceso de inyección, es importante conocer las fases que forman parte de este proceso y en qué consiste cada una:

### • Dosificación

Primera fase del proceso, en ella se prepara el material para realizar la inyección, siendo su principal objetivo “plastificar” el material. En esta fase, la granza eleva su temperatura por el trabajo mecánico del husillo en combinación con el aporte de calor de las resistencias exteriores y funde quedando en disposición de ser inyectado dentro del molde.

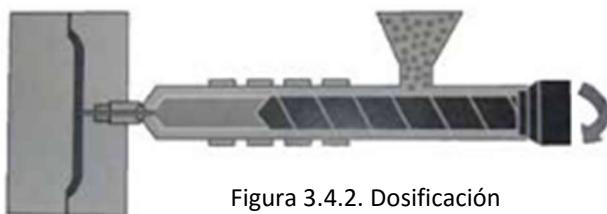


Figura 3.4.2. Dosificación

Los parámetros que influyen en esta fase son:

- **Volumen de material a inyectar:**  $V = \pi * \frac{D^2}{4} * c$  (siendo  $c$  – la carrera entre la posición final y la inicial).
- **Velocidad de giro del husillo:** viene limitada por el material, ya que todos los materiales soportan una velocidad máxima de cizalla.

$$v_{cizalla} = \frac{n * 2 * \pi}{60} * \frac{D}{2} < v_{limite\,cizalla}$$

- **Contrapresión:** presión realizada en la parte posterior del husillo para favorecer la plastificación del material. Cuanto mayor sea la contrapresión mejor será la homogeneización de la mezcla, sus valores cotidianos se encuentran entre 1-10 bares.
- **Programación de temperaturas:** que deben alcanzar las resistencias a lo largo del cilindro, estas temperaturas dependen del tipo y de la cantidad de material a inyectar.
- **Succión:** se usa para hacer retroceder el husillo con el fin de liberar la presión del material acumulado en la puntera.

### • Llenado

En esta fase, el plástico fundido pasa a través de la puntera hacia el interior del molde, llenando las cavidades que se vaya encontrando. El llenado se hace gracias al movimiento de avance rápido producido por el husillo.



Figura 3.4.3. Llenado

Los parámetros que influyen en esta fase son:

- **Velocidad de inyección/tiempo:** velocidad de avance del husillo (mm/s), regula el caudal del material desde la cámara de plastificación hacia el molde. A mayor velocidad de inyección, menor duración de esta fase y mayor caudal.
- **Presión de inyección:** es la presión necesaria para mantener la fuerza de cierre y ser capaz de inyectar el material dentro de la cavidad superando, entre otras cosas, la viscosidad del material, la geometría de la pieza o las condiciones de inyección. No es un dato de entrada sino que es un resultado del proceso consecuencia de inyectar en unas determinadas condiciones de temperatura y velocidad
- **Presión límite:** es la presión máxima programada para actuar como protección frente a problemas durante la inyección, por tanto, se introduce como dato de entrada por seguridad.

### • Compactación o mantenimiento

En esta fase el material introducido entra en contacto con el molde que está mucho más frío y empieza a perder temperatura. La pieza empezará a contraerse por lo que necesitará más material para llenar el molde. Durante esa fase, el husillo ejerce una presión sobre el material en la puntera introduciendo nuevo material para alcanzar el volumen deseado.

La compactación solo será efectiva mientras el material no haya solidificado, una vez que la entrada o las secciones más restrictivas se encuentren frías, no seguirá entrando material a la cavidad.



Figura 3.4.4. Compactación

Los parámetros que influyen en esta fase son:

- **Presión de mantenimiento:** presión necesaria para introducir nuevo material dentro del molde, rellenando los huecos originados por la contracción sufrida en el enfriamiento.
- **Tiempo de compactación:** tiempo necesario para obtener una calidad dimensional aceptable sin alargar en exceso el proceso, no obstante, el tiempo de compactación efectivo será el tiempo necesario hasta que se enfríe la entrada de material.

#### • Solidificación y enfriamiento

En esta última fase, la pieza se mantiene el molde hasta alcanzar una temperatura adecuada de expulsión para no causar deformaciones en la superficie de la pieza. Una vez expulsada, se sigue enfriando hasta alcanzar la temperatura ambiente.

Esta fase, es la más duradera de todo el proceso, siendo en la mayoría de ocasiones del 50 % del tiempo total de inyección.

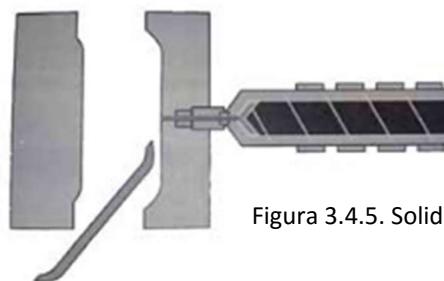


Figura 3.4.5. Solidificación

Los parámetros que influyen en esta fase son:

- **Tiempo de enfriamiento:** tiempo necesario para alcanzar la temperatura de expulsión.
- **Temperatura del molde:** temperatura regulada por el refrigerante y el caudal circulando por los circuitos de refrigeración.

## 5. Resultados principales

- **Tiempo de llenado:** tiempo que le cuesta a la pieza llenarse de manera completa. Se relaciona con la velocidad de llenado, la cual es controlada mediante el caudal:  $Q = v * A$ , ya que a pequeños tiempos de inyección se producen velocidades elevadas.

Conviene que la temperatura se mantenga uniforme durante el tiempo de inyección, admitiéndose una variación de  $\pm 8^{\circ}\text{C}$ , con ello también nos sirve para ver si la pieza termina de llenar o queda incompleta.

- **Presión de inyección:** aparece en la fase de llenado y es la presión necesaria para que el molde se llene en las condiciones de temperatura y caudal indicados a la que se inyecta el material en el molde, tiene que ser la suficiente para que se pueda conseguir la velocidad deseada, y por tanto, el tiempo de inyección estimado.

- **Relación entre velocidad y presión:** la velocidad de inyección está relacionada directamente con la presión de inyección, a velocidades muy altas, la presión de inyección crece rápidamente, a causa de la resistencia al flujo en la boquilla y en la entrada de la cavidad. Con velocidades menores, en cambio, el plástico se va solidificando a medida que inyecta el material, aumentando la viscosidad y disminuyendo la sección de paso.

Esta relación también se tiene en cuenta con la temperatura a través de la viscosidad o con la geometría del molde, donde para caminos de flujo más largos y menores espesores, la presión requerida es mayor. La fórmula que lo define es la siguiente:

$$P_{\text{iny}} = \frac{8 * Q * L * \eta}{\pi * r^4}$$

-  $Q$  = Caudal de material plástico      -  $L$  = longitud de flujo

-  $\eta$  = viscosidad                                  -  $r$  = espesor pieza

- **Temperatura en el frente de flujo:** temperatura del material solo durante el tiempo de inyección, lo ideal sería que fuese constante durante todo ese tiempo, aunque en los casos reales se admite una variación de temperatura entre  $8-10^{\circ}\text{C}$ . Un cambio mayor suele indicar que el tiempo inyección es demasiado corto o se puede producir degradación del material o defectos superficiales.

- **Líneas de soldadura:** también llamadas líneas de flujo, son puntos débiles o defectos visibles que se crean cuando dos o más rutas de flujo convergen durante el proceso de llenado y las moléculas de polímero se desalinean. Se pueden deber al flujo de material en torno a agujeros en la pieza, a que haya varias entradas de inyección o debido a espesores variables.

Si los distintos frentes de flujo se enfrian antes de encontrarse, no se mezclaran bien y podrían crear un punto débil en la pieza moldeada interesando que las líneas de soldadura se formen a temperatura y presión altas, es decir, cuanto más cerca del punto de entrada mejor porque allí la presión y temperatura son mayores.

- **Atrapamientos de aire:** se producen cuando la masa fundida atrapa y comprime una burbuja de aire o gas entre dos o más frentes de flujo convergentes, o entre el frente de flujo y la pared de la cavidad. Normalmente, el resultado es un agujero pequeño o un defecto en la superficie de la pieza.

- **Deformaciones:** Las deformaciones son debidas a que la pieza no contrae en toda su geometría por igual cuando se enfria, al no contraer igual, unas partes “tiran” de otras y se produce la deformación o alabeo. Las causas que provocan esa contracción diferencial son varias, siendo las más importantes:

- La pieza no enfria por igual bien porque hay zonas más calientes que otras por tener diferentes espesores o porque el sistema de refrigeración no actúa por igual en todo el molde. Al tener diferentes temperaturas no contrae de la misma forma.
- La pieza no se compacta por igual en todas las zonas. Las zonas más alejadas del punto de entrada compactan menos al tener el material mucha más dificultad para llegar. Las zonas menos compactadas contraen más.
- El material no avanza en una única dirección. El material contrae en la dirección de avance del flujo; si avanza en varias direcciones, la contracción no se dará por igual en las distintas partes de la pieza.

- **Fuerza de cierre:** es la fuerza máxima para mantener el molde cerrado durante el llenado, el cálculo de esta fuerza es una función de la presión que hay en el molde, puede ser tanto la de inyección como la de compactación y el área proyectada de la pieza sobre los ejes XY, quedando la fórmula de la siguiente forma:  $F_c = A_p * P_i$ .

- **Presión XY:** En un punto del molde, la presión va decreciendo conforme se va enfriando la pieza. Cuanto más se enfría la pieza más viscoso está el material y menos presión puede transmitir para seguir empujando el material.

- **Contracción volumétrica:** Es el cambio de volumen que experimenta una pieza cuando se enfría una vez transformada, es decir, la factibilidad que tiene una pieza a ser compactada. La contracción se representa mediante porcentaje.

- **Orientación del tensor de fibra:** muestra el grado de orientación de las fibras al final del proceso de moldeado. Los valores asemejados en los dibujos significan que, en valores cercanos a 1 indica una probabilidad alta, mientras que en valores cercanos a 0 indican la posibilidad de una organización más aleatoria de las fibras en el producto final. Comprender bien la orientación de fibra en una pieza puede ayudar a comprender las propiedades mecánicas del producto acabado.

#### - Tiempo de llenado

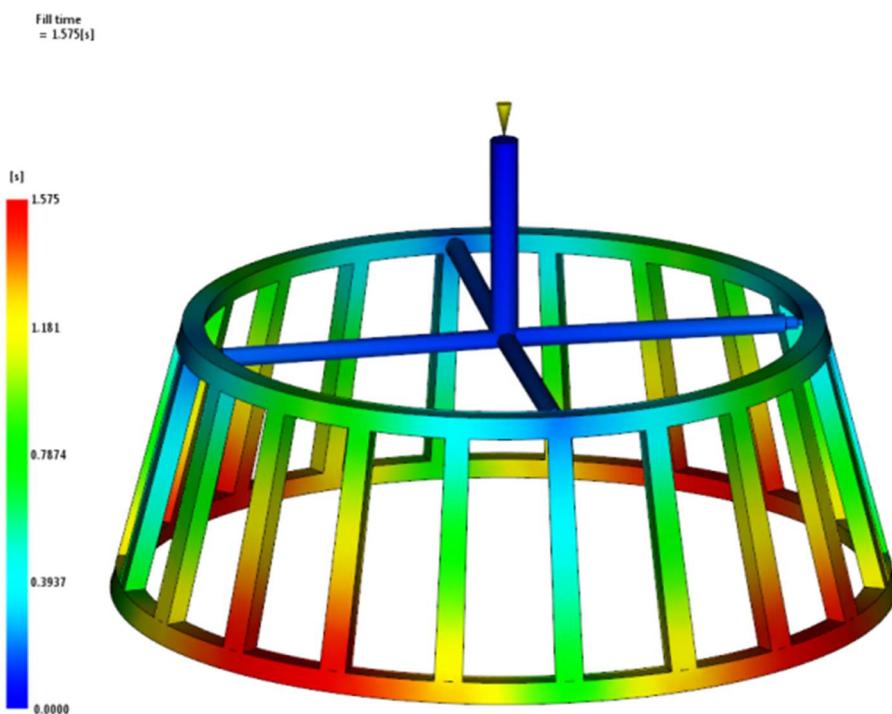


Figura 3.5.1

Fill time  
= 1.582[s]

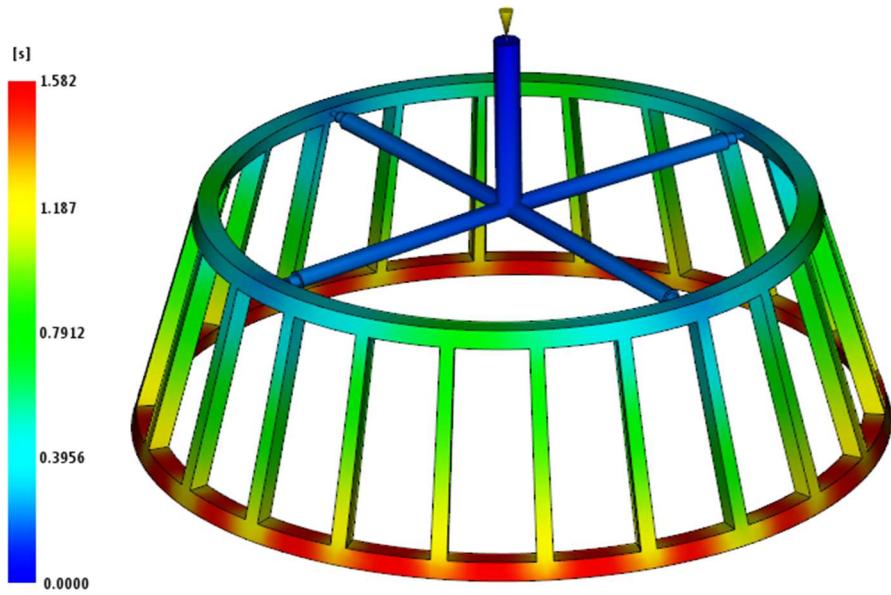


Figura 3.5.2

Fill time  
= 1.570[s]

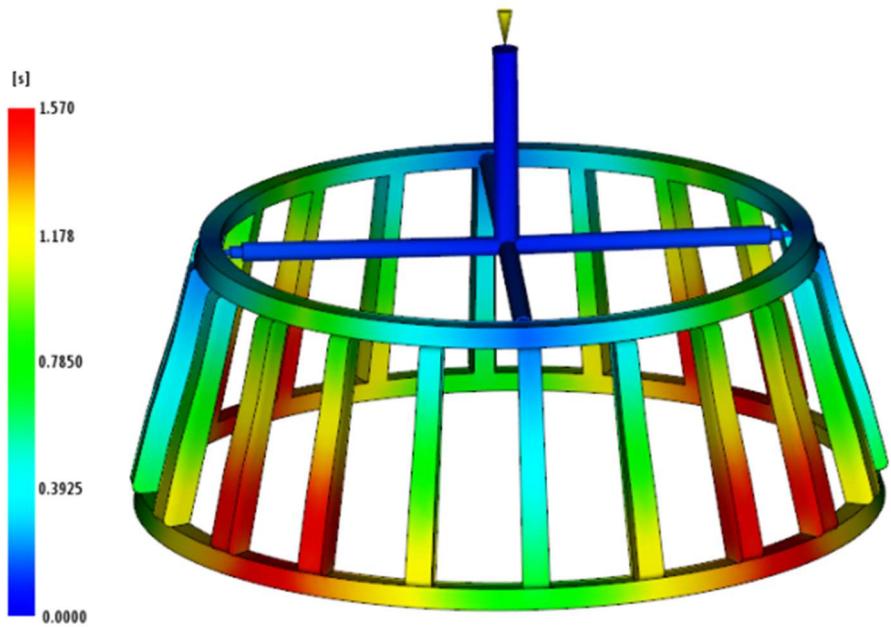


Figura 3.5.3

Como se observa, en este primer parámetro al poner un único punto de inyección de plástico en la parte superior, el llenado se produce de manera simultánea llegando a llenar la pieza por completo aún con la diferencia de espesores existente entre los anillos y los travesaños de la jaula.

La diferencia entre las figuras radica en que en la figura 3.5.2, que es donde menos anchura tienen los travesaños la parte más tardía en llenarse es el anillo inferior, pero se realiza de manera simultánea en todo el anillo, mientras que en las figuras (3.5.1 y 3.5.3) se llenan de manera similar entre los travesaños y el anillo inferior, pero no llegando a todas las zonas finales de manera simultánea. Por tanto, el mejor llenado se realiza en la figura 3.5.2. En todos los casos, se ha impuesto en las condiciones de proceso un tiempo de llenado de 1.5 segundo.

#### - Presión de inyección

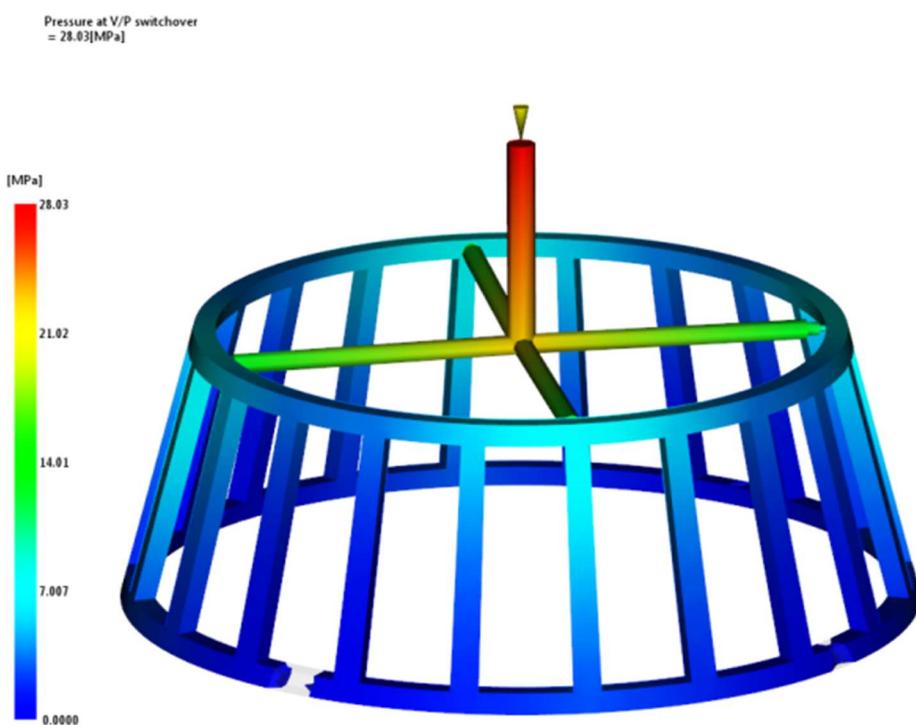


Figura 3.5.4

Pressure at V/P switchover  
= 35.22[MPa]

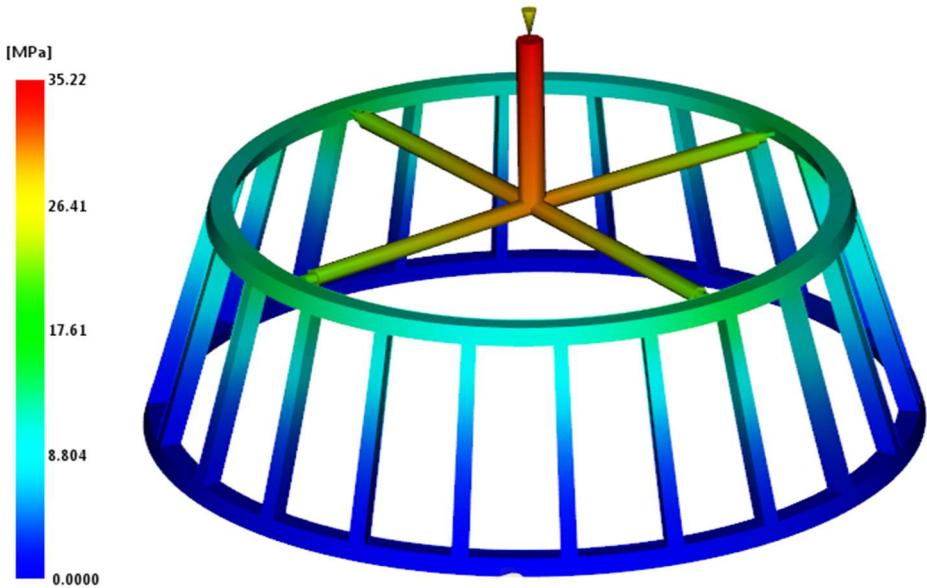


Figura 3.5.5

Pressure at V/P switchover  
= 31.73[MPa]

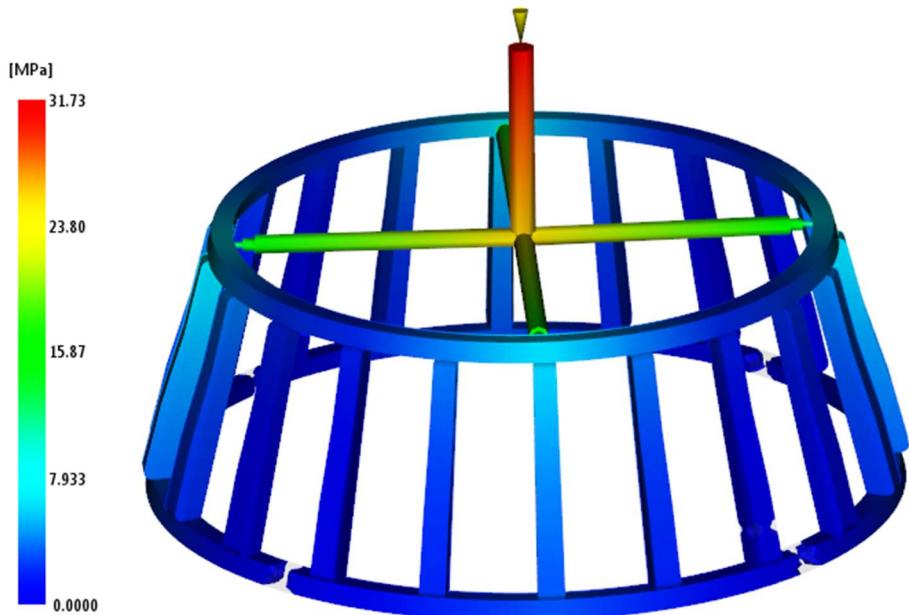


Figura 3.5.6

Es la presión máxima de inyección antes de cambiar a compactación. Se observa como la presión cercana a los puntos de inyección es máxima, debido a que es cuando más material tiene que transportar a través del molde y es mínima en las zonas donde finaliza la inyección, ya que no tiene que empujar material en su camino.

Se observa como aumenta al inicio de la inyección de manera muy rápida debido a la constante cantidad de material que tiene que meter en el molde y luego se mantiene constante durante el mantenimiento de la inyección. Los valores máximos de uso que proporcionan las máquinas es de aproximadamente 200 Mpa.

En los tres casos la presión se produce de manera similar, destacando únicamente que en la figura 3.5.5 hay mayor presión debido al menor espesor, particularmente en el anillo superior, que en los otros dos casos.

#### - Temperatura en el frente de flujo

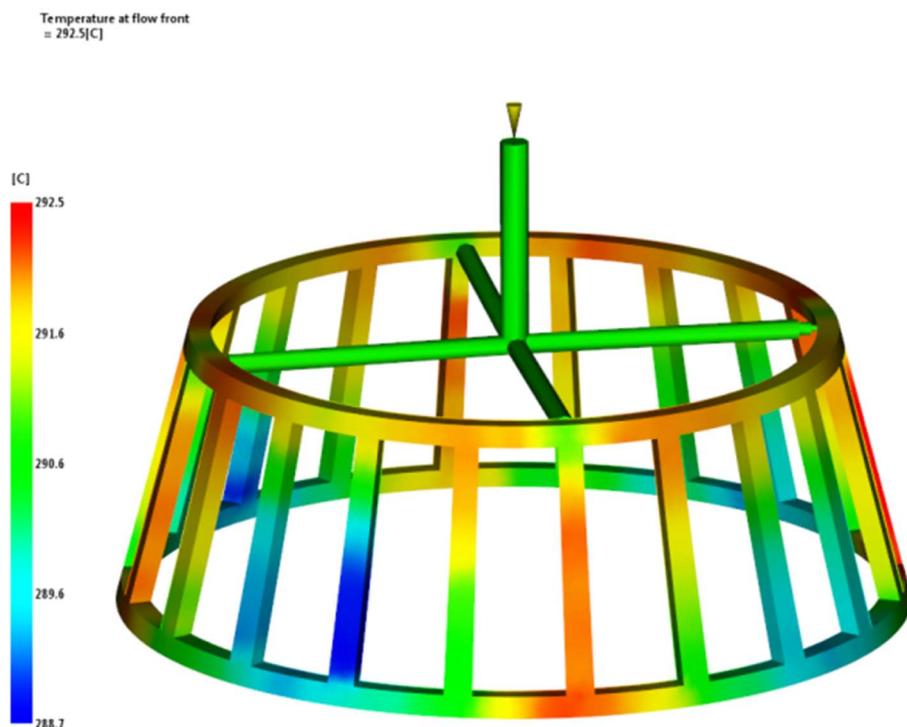


Figura 3.5.7

Temperature at flow front  
= 293.1[C]

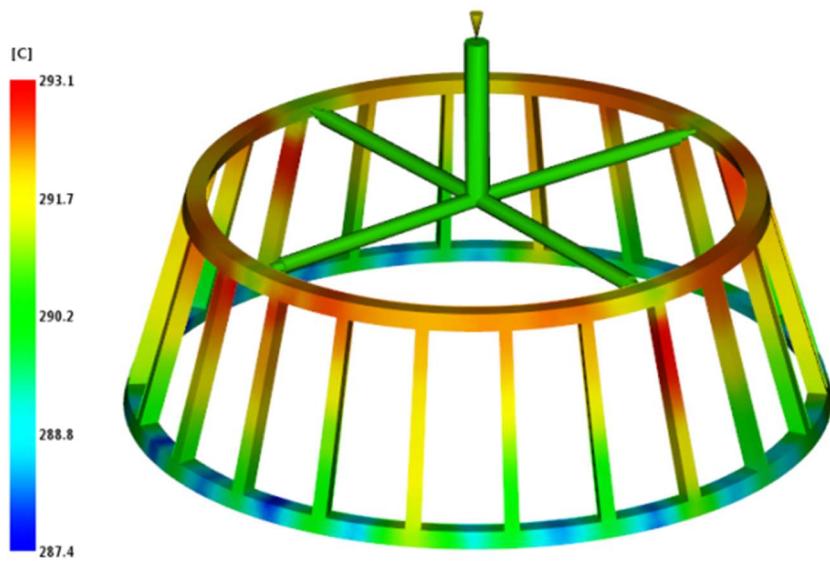


Figura 3.5.8

Temperature at flow front  
= 293.7[C]

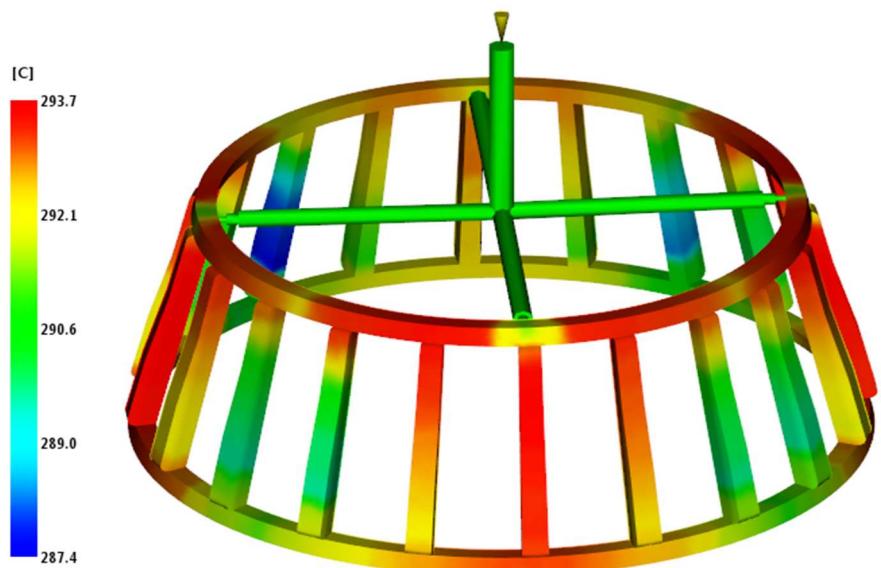


Figura 3.5.9

La variación de temperatura del material durante el tiempo de inyección es inferior a 8 grados en los tres casos, por tanto esta en el rango aconsejable del tiempo de inyección, cabiendo destacar que en la figura 3.5.9 es donde se encuentran mayores zonas con la temperatura más alta.

### - Líneas de soldadura

Weld lines  
= 135.0[deg]

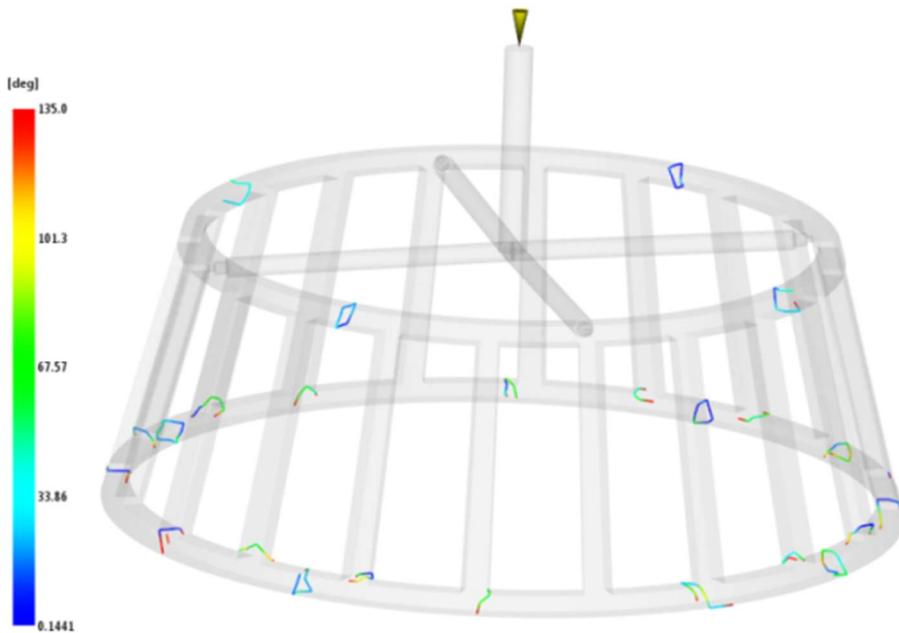


Figura 3.5.10

Weld lines  
= 135.0[deg]

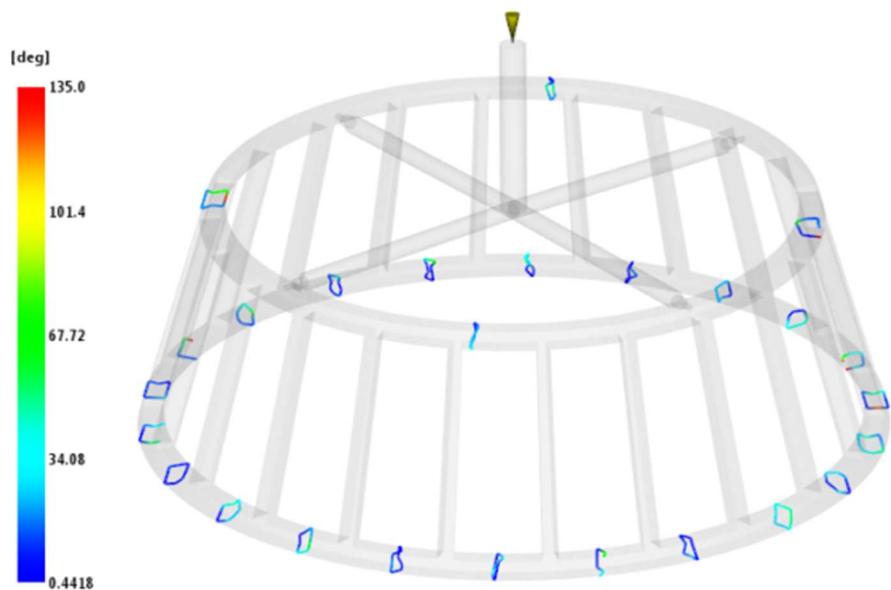


Figura 3.5.11

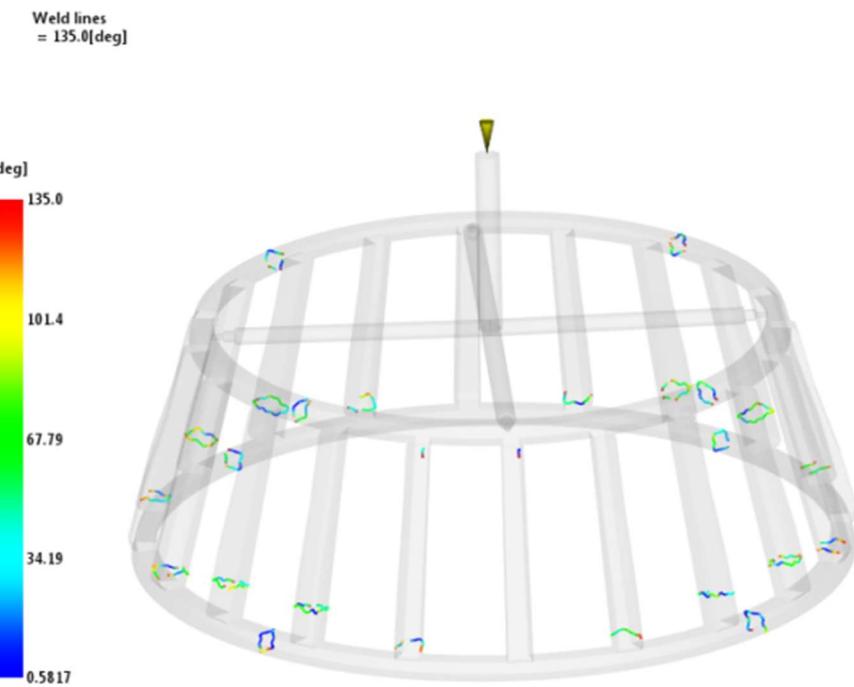


Figura 3.5.12

Se crean en la parte inferior de la jaula, y alrededor de los travesaños, ya que es donde confluyen varias rutas de flujo, siendo por tanto las zonas más débiles de la pieza.

#### - Atrapamientos de aire

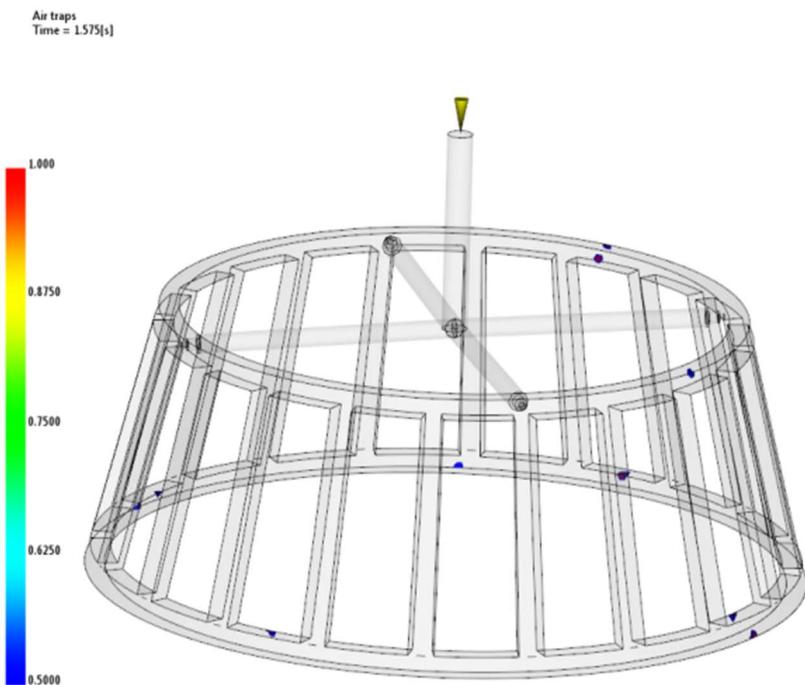


Figura 3.5.13

Air traps  
Time = 1.582[s]

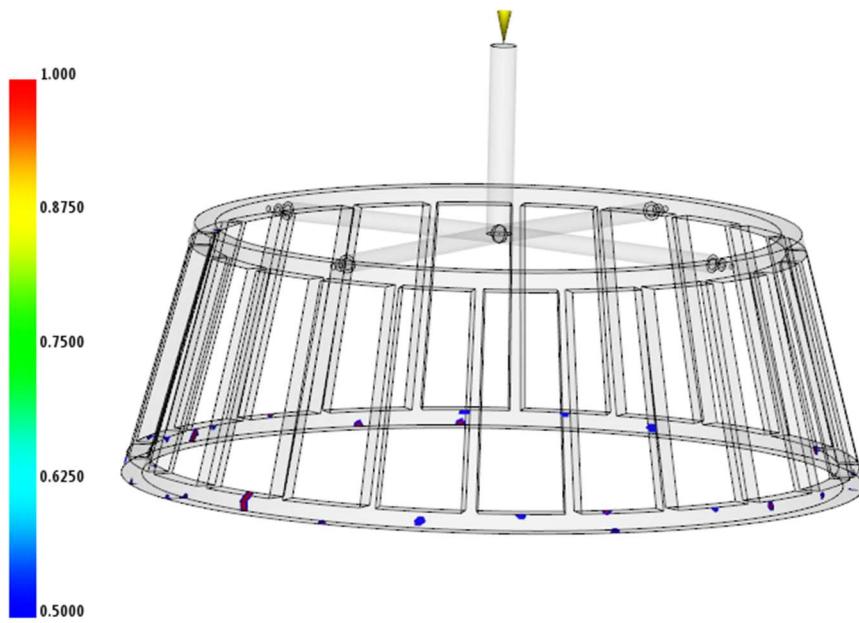


Figura 3.5.14

Air traps  
Time = 1.570[s]

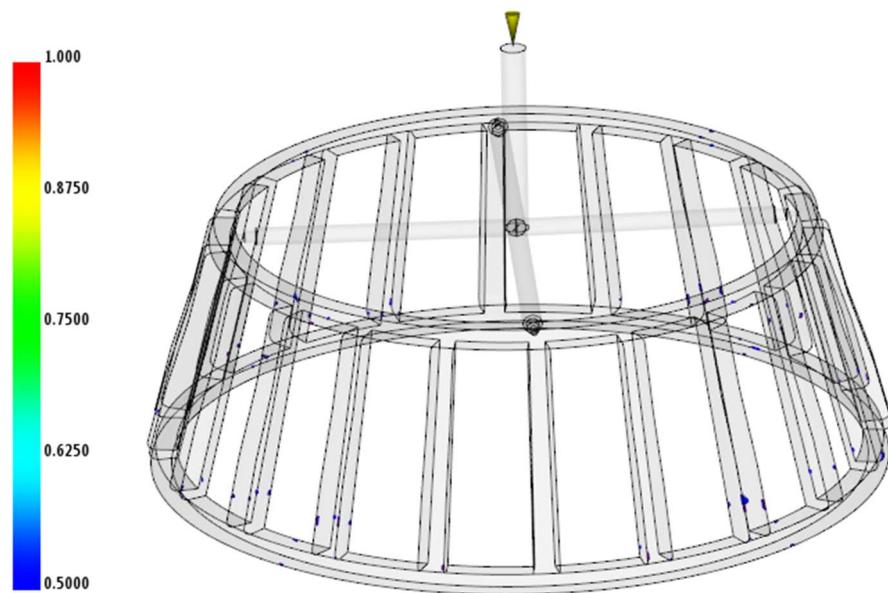


Figura 3.5.15

Nos indica donde habrá que prever salidas de gases en el molde, se pueden deber a variación de velocidades o presiones a la hora de inyectar el plástico.

- Fuerza de cierre

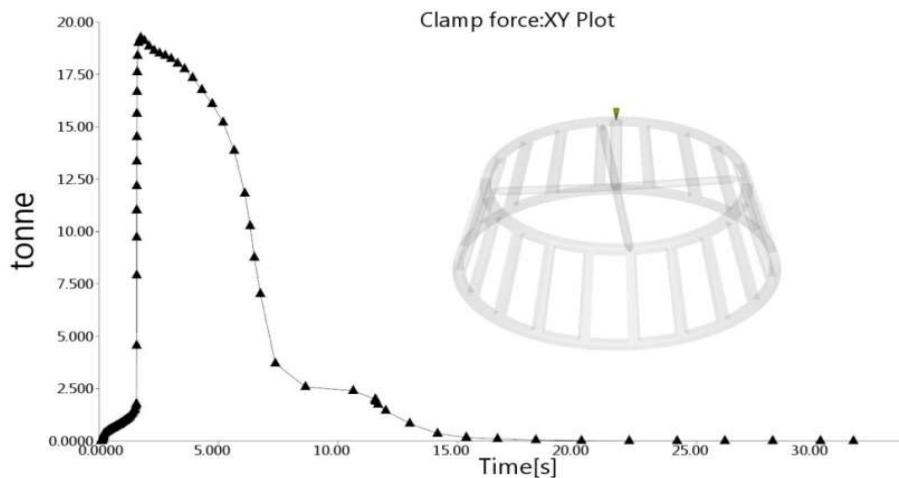


Figura 3.5.16

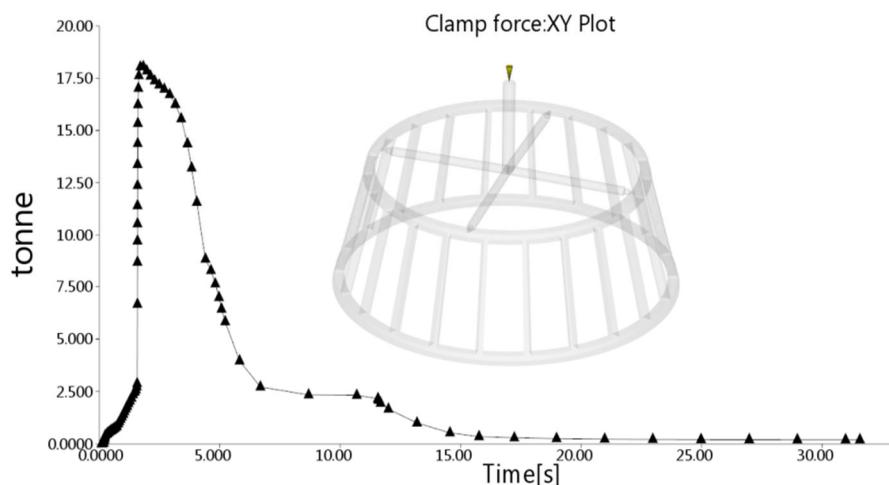


Figura 3.5.17

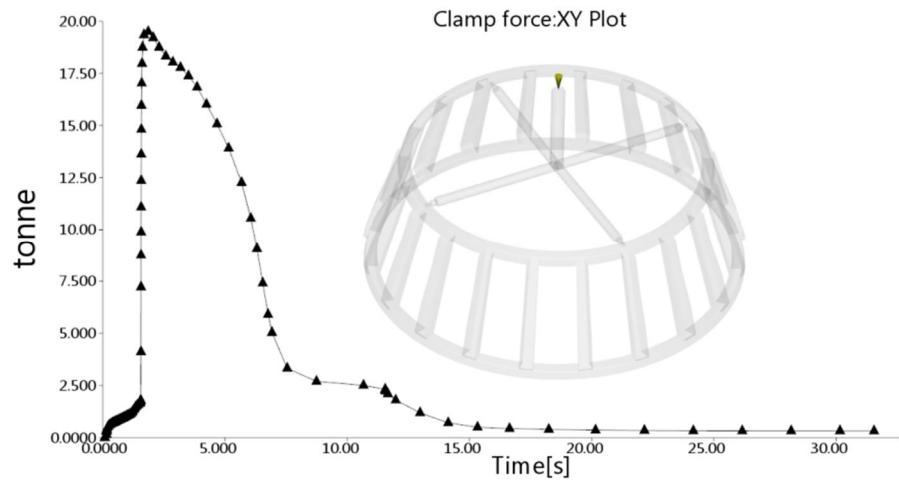


Figura 3.5.18

La fuerza de cierre del molde es aproximadamente de 20 Toneladas a los 2 segundos de inyección, siendo en los tres casos similar ya que el concepto de la pieza es siempre el mismo aunque se le añada o quite algún efecto para mejorar su rendimiento.

Esta fuerza de cierre está relacionada con las condiciones de presión y compactación impuestas, para los 3 casos se ha establecido un intervalo de tiempo de 10 s a 60 MPa. En cualquier caso es un valor de fuerza de cierre bajo, que no supone ningún problema para trabajar en cualquier maquina.

#### - Contracción volumétrica

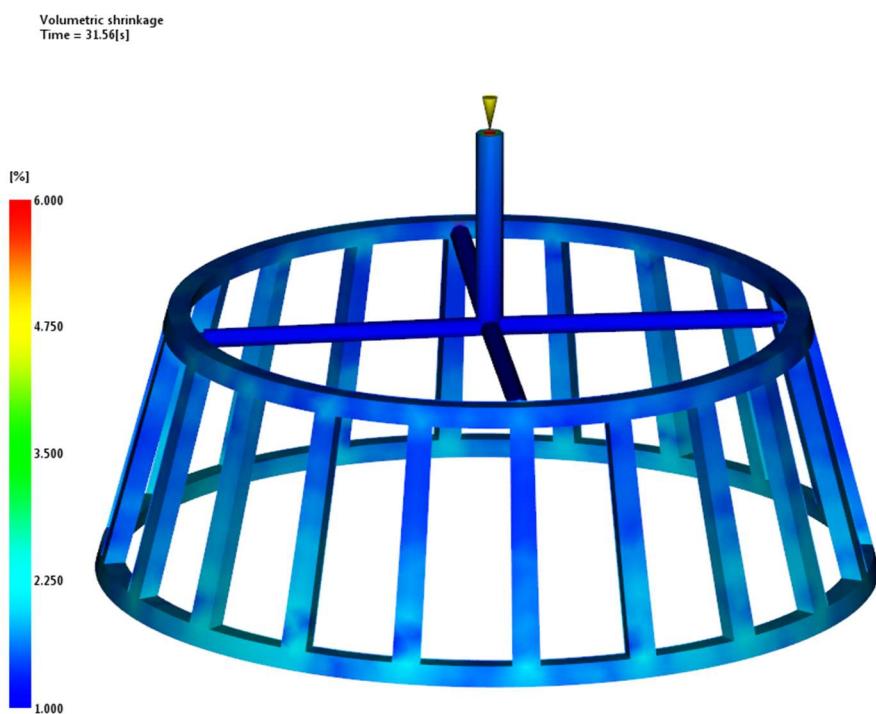


Figura 3.5.22

Volumetric shrinkage  
Time = 31.57[s]

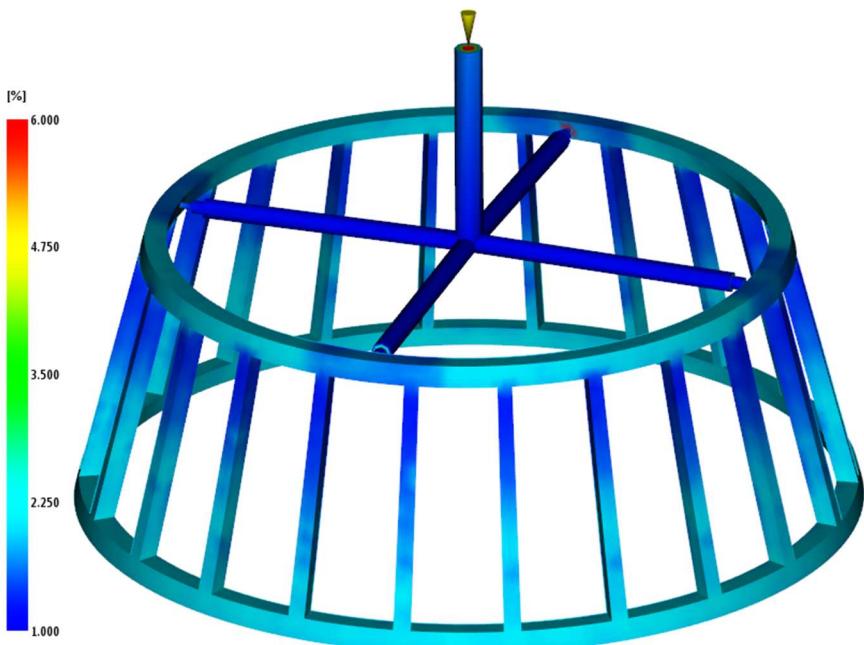


Figura 3.5.23

Volumetric shrinkage  
Time = 31.56[s]



Figura 3.5.24

La contracción volumétrica mide la efectividad al compactado de una pieza, en los tres casos se puede ver como la media de compactación son entre 1-2.75%, unos valores adecuados para el material que se está estudiando.

### - Orientación del tensor de fibra

Fiber orientation tensor  
= 0.9093

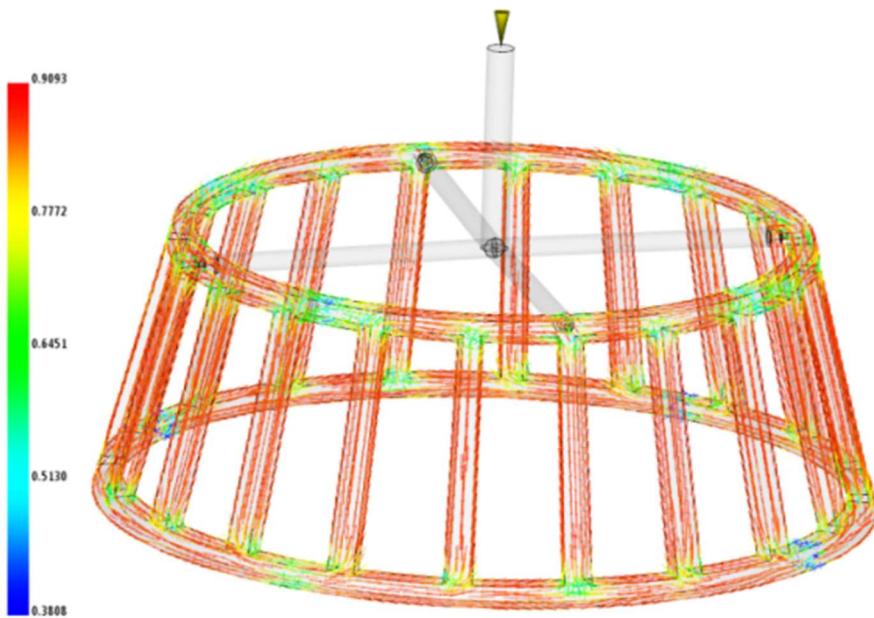


Figura 3.5.26

Fiber orientation tensor  
= 0.8976

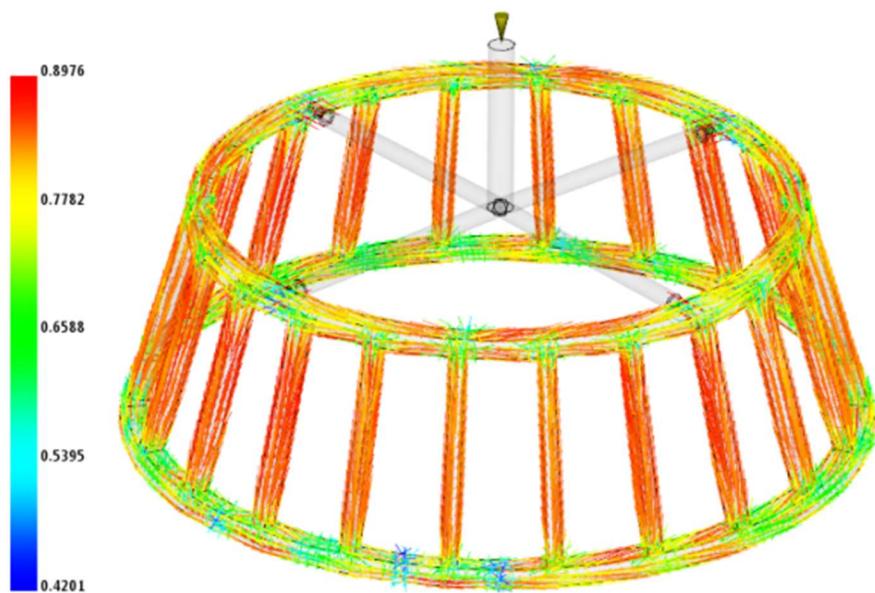


Figura 3.5.27

Fiber orientation tensor  
= 0.9248

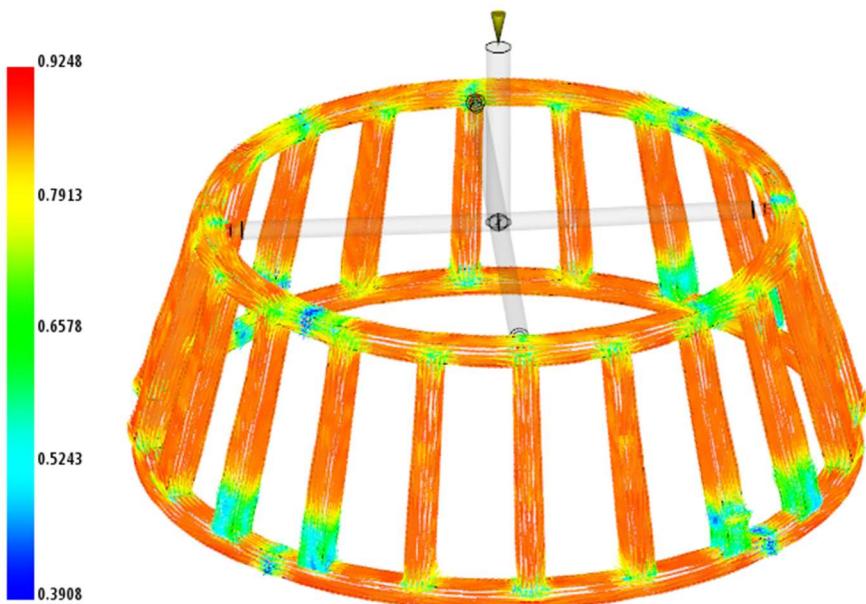


Figura 3.5.28

Se observa que los principales problemas de orientación de fibra son en la unión de cada uno de los diferentes travesaños, ya que es donde confluyen varias rutas de material fundido, es decir, donde hay líneas de soldadura y en la parte donde se inyecta el plástico.

Resultados	Jaula original	Jaula con menor anchura	Jaula reforzada
<b>Llenado uniforme</b>	NO	SI	NO
<b>Presión de inyección - MPa</b>	28.03	35.22	31.73
<b>Temperatura en el frente de flujo - °C (máxima temperatura)</b>	292.5	293.1	293.7
<b>Temperatura en el frente de flujo - °C (diferencia entre máxima y mínima)</b>	3.8	5.7	6.3
<b>Fuerza de cierre – Tn (máxima)</b>	19.7	18.7	20.2
<b>Contracción volumétrica - % (media)</b>	1.5	3.5	3
<b>Orientación del tensor de fibra</b>	0.9093	0.8976	0.9248

Tabla 3.5.1

A continuación, se ha expuesto una tabla en la que se han representado los datos numéricos de cada uno de los resultados para los casos estudiados, con esto se conseguirá tener una visión más global de cómo afecta cada resultado y saber si las modificaciones realizadas a la jaula original tienen alguna influencia a destacar o por el contrario no aportan ninguna solución.

Los resultados que sean más visuales como atrapamientos de aire o líneas de soldadura, bastara con observarlos en cada una de las figuras para saber cómo afecta a cada jaula sin tener en cuenta sus datos numéricos, ya que no quedan definidos por un valor numérico.

# Anexo 4: Digimat

1. Que es Digimat.....	102
2. Entorno de Digimat.....	104
· Barra principal	
· Barra de herramientas	
· Ventana del modelo estructural	
· Ventana del material Digimat	
· Ventana del proceso de fabricación	
· Análisis final	
3. Estudio “Jaula de alojamiento para rodamientos”.....	112
· Caso 1: Jaula original	
· Caso 2: Jaula con reducción de anchura de los travesaños	
· Caso 3: Ensamblaje entre jaula original y un refuerzo en el travesaño	

## 1. Que es Digimat

Digimat es una plataforma de modelización estructural y de materiales no lineales, cuya tecnología se basa en aproximaciones micromecánicas para definir con precisión el comportamiento de materiales compuestos multifase y facilita el proceso desde el análisis estructural FEA, el diseño del material y el proceso de fabricación. Ayuda a la obtención de productos innovadores, optimizados y eficaces.

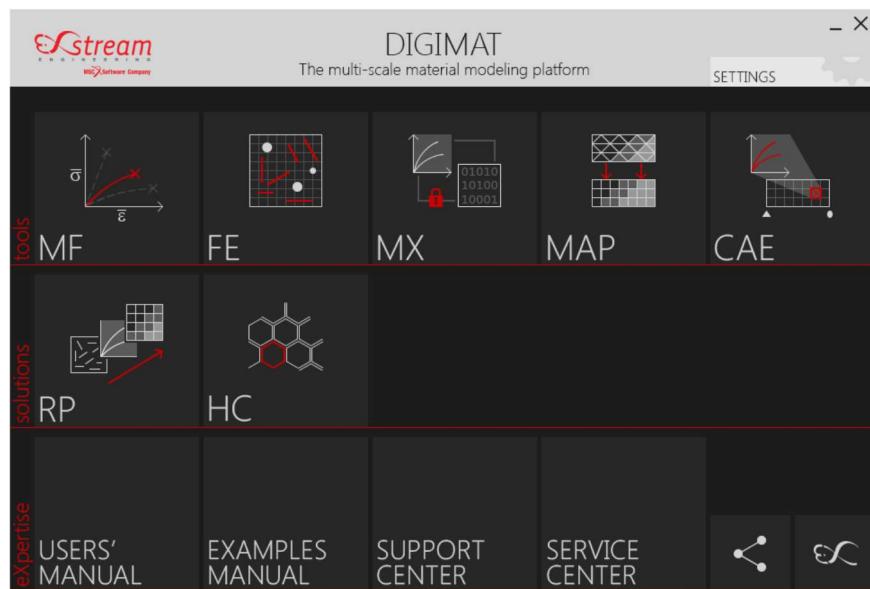


Figura 4.1.1

La plataforma Digimat ofrece diversos tipos de solución o herramienta según el nivel de conocimientos del usuario, como se puede ver en la figura 4.1.1. Para el caso concreto de “Jaula de alojamiento para rodamientos” se va a centrar únicamente en la herramienta RP (plásticos reforzados).

La herramienta RP sirve para analizar el rendimiento de la fibra que refuerza los plásticos, es una herramienta que permite cerrar la distancia entre los procesos de simulación (p.ej. entre el moldeo por inyección y las predicciones en el lado estructural) y los pasos necesarios para su estudio se resumen en la figura 4.1.2



Figura 4.1.2

En la parte de procesos proviene el archivo de moldeo por inyección (Moldflow), en la parte de material se resumen las características del material a seleccionar (Digimat) y en la parte de comportamiento estructural (Abaqus).

En resumen, Digimat permite un enfoque preciso sobre el material multi-escalar y la estructura de modelado teniendo en cuenta el proceso sobre la microestructura del material en el análisis de elementos finitos.

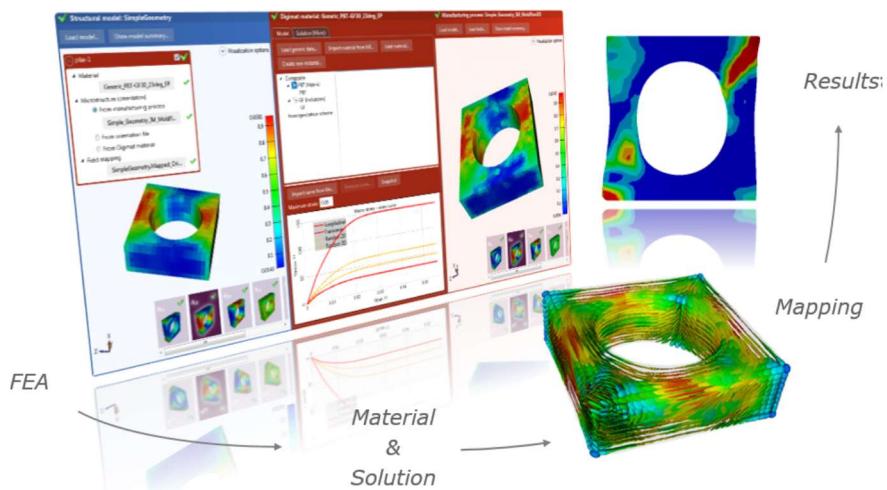


Figura 4.1.3

Por tanto, los pasos a seguir para analizar un caso concreto en la herramienta RP, como se puede observar en la figura 4.1.3, serian los siguientes:

- Cargar modelo de análisis de elementos finitos
- Asignar material de Digimat
- Elegir método de solución Digimat
- Carga de datos de procesamiento
- Procesar el mapeo
- Observar los resultados

## 2. Entorno de Digimat

El entorno de Digimat RP se divide en 2 partes principalmente: un área de trabajo y una barra estructurada.

A su vez, el área de trabajo, cuyas ventanas se pueden mover y organizar libremente, se divide en 3 ventanas:

- Ventana del modelo estructural
- Ventana del material Digimat
- Ventana del proceso de fabricación

Por el contrario, la barra estructurada está dividida en:

### • Barra principal



Figura 4.2.1

Es una barra de herramientas (Figura 4.2.1) que da acceso a las funciones relacionadas con la gestión de un proyecto, con las siguientes opciones:

- **Archivos:** Contiene las funciones guardar y cargar un proyecto. También se puede acceder desde la esquina superior izquierda de la barra (Figura 4.2.2).

Se puede guardar en dos formatos: en (.dcp) donde no se necesitan los archivos de entrada para crear el proyecto o en (.dlp), donde es necesario que los archivos de entrada estén presentes en la ubicación original del disco. También, se abrirá una ventana emergente pidiendo el sistema de unidades con el que se desea trabajar en el proyecto (Figura 4.2.3).

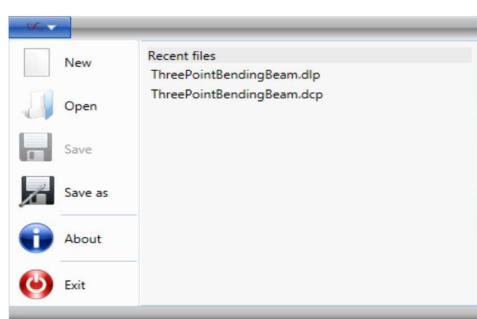


Figura 4.2.2

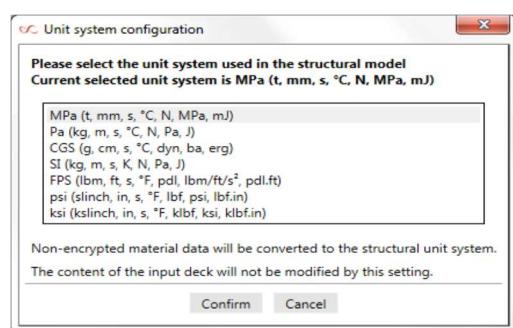


Figura 4.2.3

- **Flujo de trabajo:** son los archivos necesarios para poder analizar el caso real, siendo estos, un modelo estructural, un material Digimat aplicado a una región del modelo y un modelo del proceso de fabricación definido mediante el tensor de orientación.

- **Análisis de elementos finitos:** se analizan los datos para la generación de todos los archivos. Desde Digimat RP también se puede iniciar el análisis y supervisar el progreso, donde el botón “Monitor” contiene todos los análisis puestos en marcha.

- **Diseño de ventana:** al iniciar Digimat RP solo se maximiza la ventana del modelo estructural, para establecer las tres con el mismo tamaño debemos hacer clic en “Tile horizontally”. Pulsando el botón “Auto arrange” se adaptan en tiempo real las dimensiones y las posiciones de las ventanas, mientras que haciendo clic en “Workspace snapshot” tomas una instantánea del espacio de trabajo.

#### • Barra de herramientas

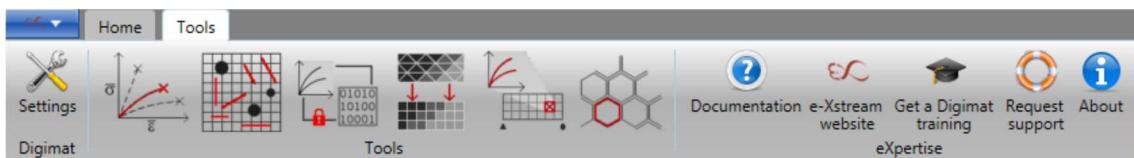


Figura 4.2.4

A diferencia de la barra principal, esta barra la tienen en común todas las soluciones de Digimat, no es específico para Digimat RP. Contiene las siguientes funciones:

- **Gestor de configuración:** muchas configuraciones pueden ser cambiadas haciendo clic en el botón “Settings”. Esta ventana se divide en 5 pestañas (figura 4.2.5).

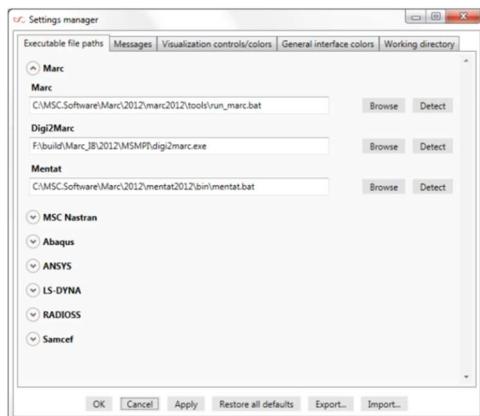


Figura 4.2.5

- Rutas de archivos ejecutables: la primera pestaña contiene todos los ajustes necesarios para ejecutar un trabajo a nivel local, si un ajuste no esta será imposible ejecutar los análisis relacionados.
  - Mensajes: contiene los ajustes relacionados a los diálogos y los mensajes que pueden aparecer.
  - Control de visualización/colores: contiene la configuración para mostrar el modelo estructural y el modelo del proceso de fabricación.
  - Colores generales de la interfaz: permite cambiar el color del texto y el color del fondo de pantalla de la ventana del modelo estructural.
  - Directorio de trabajo: influye en la ubicación de los archivos temporales de Digimat-RP.
- **Herramientas:** proporcionan acceso directo a las diferentes herramientas Digimat.
- **Grupo eXpertise:** contiene accesos directos para abrir la documentación Digimat, abrir la página web e-Xstream o páginas de sus cursos de formación.

## • Ventana del modelo estructural

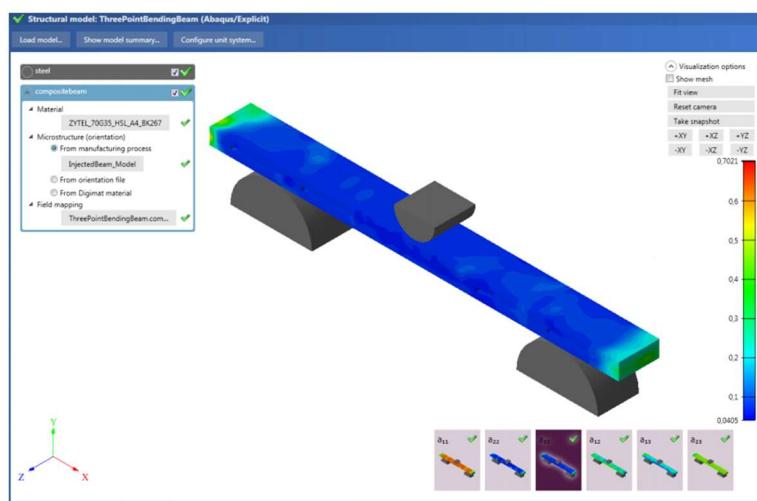


Figura 4.2.6

- **Modelo estructural:** es la ventana principal que contiene una visualización en 3D del modelo y una lista de los materiales añadidos a cada región del modelo.

También, al abrir el modelo se abre una ventana para poder elegir el sistema de unidades, este sistema también se puede cambiar después de cargar el modelo.

Cuando se añade el material a una región del modelo, se debe especificar los datos de orientación de fibra, estos datos pueden venir del proceso de fabricación (se ha realizado en una malla específica y necesita ser traspasada a la malla estructural), desde un archivo de orientación de fibra (ya disponible en la malla estructural) o desde el material Digimat (se utilizará la orientación de fibra del material)

Una vez elegido el material se llevará a cabo el mapeo, hay que tener en cuenta que solo un material puede estar activado a la vez, la activación se realiza haciendo clic en el material o haciendo doble clic en una región del modelo estructural.

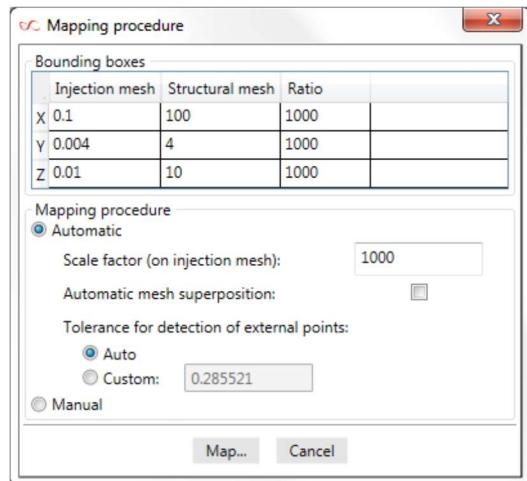


Figura 4.2.7

Para mapear se necesita que los datos de orientación de fibra provengan de la malla estructural, y se hace clic en “Map required fields” donde se permite controlar el proceso. Hay dos procedimientos de mapeo:

- **Mapeado automático:** se deben definir una serie de parámetros para controlar el proceso de mapeo, el factor de escala (necesario si no se utilizan las mismas unidades en la malla estructural y la de fabricación), la superposición de malla automática (necesario si no están ni en la misma posición ni orientación, tanto la malla estructural como la de fabricación) y la tolerancia para la detección de puntos externos (Digimat-MAP decidirá cuándo es punto externo o no de manera automática).
- **Mapeado manual:** se inicia la interfaz Digimat-MAP y serán cargados los siguientes datos: la malla de fabricación, los datos de orientación de la fabricación y la región de la malla estructural.

## • Ventana del material Digimat

Contiene las características necesarias para definir los materiales Digimat utilizados en el análisis. Se divide en dos fichas:

- **Ficha modelo:** contiene los parámetros relacionados con la definición física del material. A grandes rasgos la pantalla se divide en una parte superior que contiene una representación (en forma de árbol) del material compuesto, cada elemento del árbol se detalla seleccionándolo y en un parte inferior que contiene un diagrama de tensión-deformación (ensayo de tracción uniaxial) para el material compuesto con diferentes tipos de orientaciones de fibra.

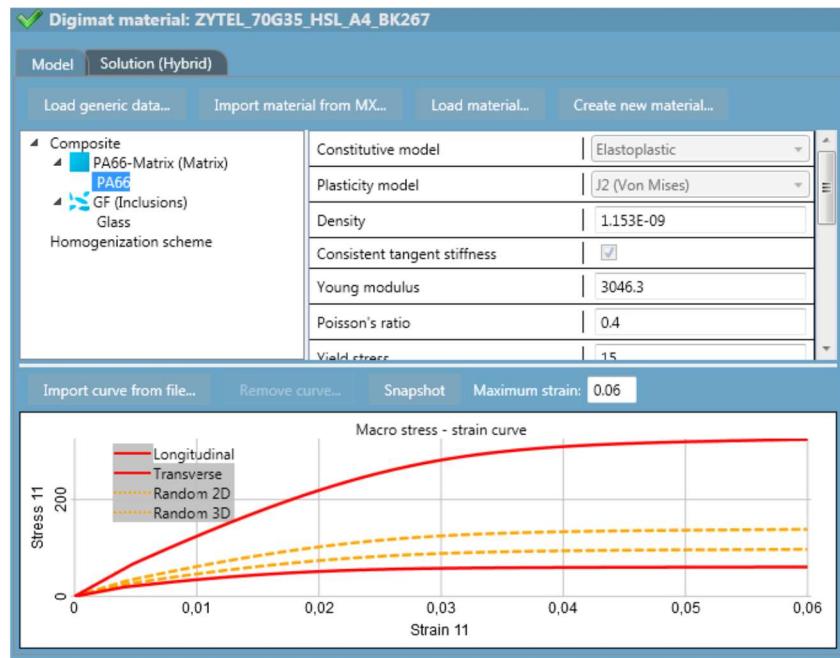


Figura 4.2.8

Entre las maneras diferentes para asignar un material están:

- **Materiales genéricos:** son materiales termoplásticos definidos por sus propiedades a diferentes temperaturas y niveles de humedad reforzados con fibra de vidrio.
- **Materiales de la base de datos:** el material compuesto también se puede obtener a partir de una base de datos.
- **Cargar material:** esta opción permite cargar un material compuesto existente en un archivo de tipo .daf / .mat.
- **Crear material:** esta opción permite crear un nuevo material compuesto. Una vez que se define completamente el material compuesto, se guarda el material compuesto en un archivo .daf y ya puede ser usado.

- Editar materiales compuestos: algunos parámetros de los materiales compuestos se pueden editar, cada vez que se modifica cualquier parámetro, la grafica de la curva tensión-deformación se actualiza para ilustrar el efecto de la modificación.

- **Ficha solución:** contiene parámetros numéricos que no están relacionados con la definición física del material compuesto.

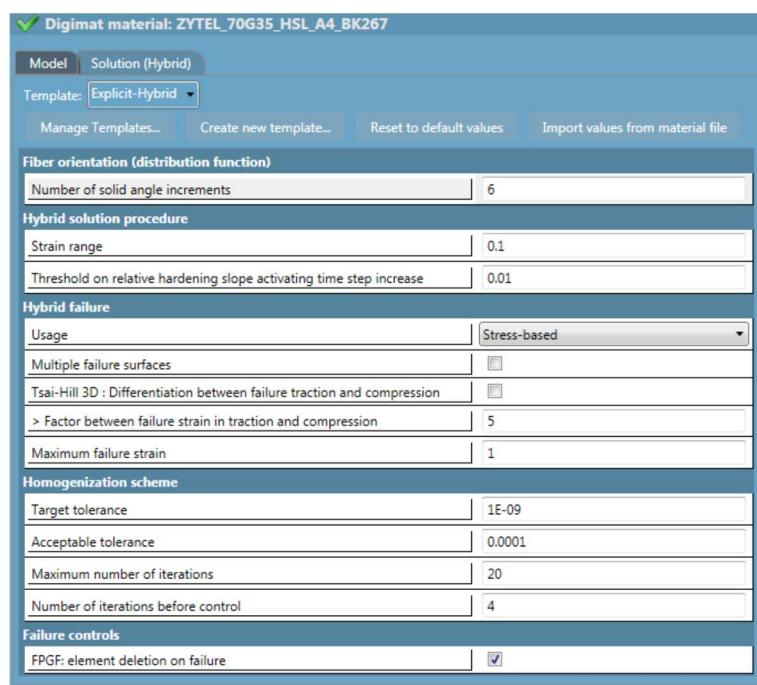


Figura 4.2.9

Estos parámetros numéricos se gestionan mediante un sistema de plantillas, siendo una plantilla, un conjunto de valores para un tipo específico de análisis de elementos finitos o algún procedimiento de solución Digimat (Híbrido, Micro...).

- Procedimiento de solución de plantillas: cuando un material Digimat se importa en Digimat-RP, a menudo, algunos parámetros numéricos se definen localmente. Cuando sea el caso, hay dos opciones:

- Mantener todos los parámetros numéricos definidos localmente para el material y combinar esos parámetros con las plantillas disponibles.
- Desechar todos los parámetros numéricos definidos localmente y basarse únicamente en la plantilla seleccionada.

También se pueden crear nuevas soluciones de plantillas mediante Digimat-RP, que viene con un conjunto de plantillas predefinidas para el análisis de los tipos más comunes. Esas plantillas son de sólo lectura. Sin embargo, es posible crear nuevas plantillas de usuario, basadas en plantillas existentes o de otras plantillas de usuario ya creadas.

### • Ventana del proceso de fabricación

Tiene como objetivo cargar la malla de fabricación, cargar los datos de orientación de fibra mediante una herramienta de simulación y validar esos datos de orientación.

Esta ventana se abre cuando se selecciona “From manufacturing process” y clicando en el botón “Add manufacturing process” en cualquier región del material, alternativamente, también se puede ir si existe ya un material aplicado sobre la pieza, haciendo clic en el área de trabajo de la barra principal.

Entre los archivos de malla que se admiten están: MSC Nastran (.bdf, .dat), Patran (.pat) o Abaqus (.inp) mientras que para los datos de orientación de fibra se admiten: Moldflow 3D (.xml), Sigmasoft (.xml) o Simpoe (.xml).

### • Análisis final

Una vez que se satisfacen todas las condiciones anteriores:

- Se ha cargado un modelo estructural
  - Se ha definido un material Digimat y asociado a una región del modelo
  - Todos los materiales Digimat se han validado
  - Todas las regiones de la pieza tienen datos de orientación de fibra
- Se pulsa el botón "Submit", se activa y se inicia la generación de ficheros. Este proceso produce los siguientes archivos:
- Una entrada, asociada al modelo estructural, modificado con los materiales especificados en Digimat y los datos de orientación.
  - Un archivo .mat para cada material Digimat utilizado en el análisis.
  - Una copia de los archivos de orientación de fibra.

Un ejemplo de resumen de salida se muestra en la Figura 4.2.10. Todos estos archivos se generan en un directorio que se pueden personalizar al comienzo.

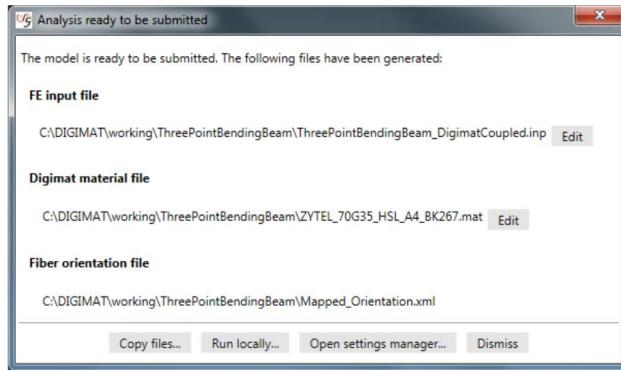


Figura 4.2.10

Por último, al iniciar un trabajo local, aparece la ventana de la Figura 4.2.11. Esta ventana permite especificar el directorio en el que se ejecutará el trabajo.

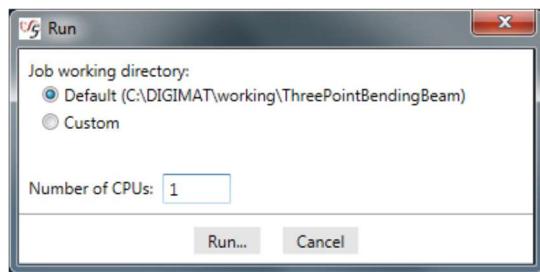


Figura 4.2.11

Una vez que se inicia un nuevo trabajo, se abre una ventana, como se muestra en la Figura 4.2.12 dividida en un panel superior que contiene una lista de todos los trabajos iniciados, un panel central que contiene una copia del archivo asociado al trabajo y un panel inferior que contiene una copia de la salida de los archivos de registro generados durante la ejecución, incluidos los archivos de registro Digimat.

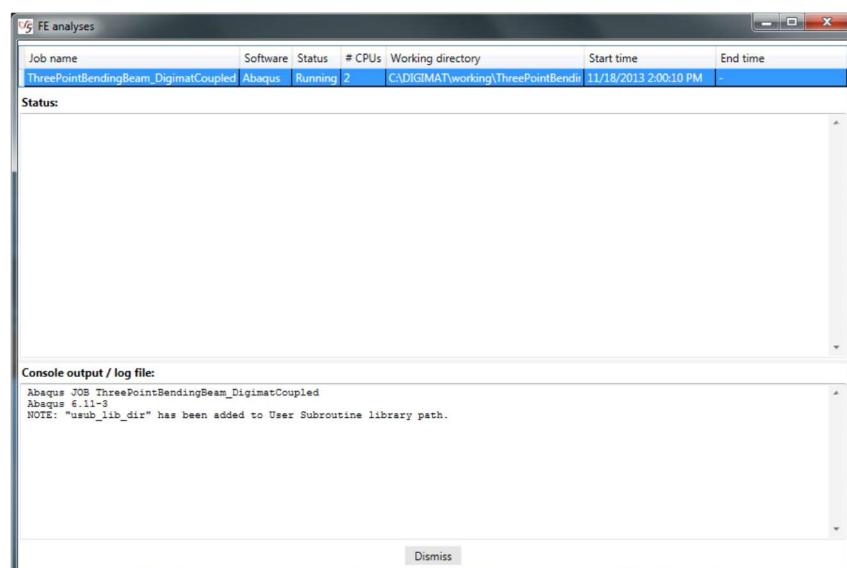


Figura 4.2.12

Todos los códigos de FEA soportan las siguientes acciones:

- Ver resultados: se abre el archivo de resultados utilizando el programa especificado en el gestor de configuración.
- Ver Tabla SDV: muestra una tabla que contiene la descripción de las variables de estado utilizadas por Digimat para el trabajo seleccionado.
- Abrir directorio de trabajo: abre el directorio de trabajo.
- Mostrar línea de comandos: muestra el comando exacto utilizado por Digimat-RP para iniciar el trabajo.
- Terminar: acaba el trabajo antes de que se complete.

### 3. Estudio “Jaula de alojamiento para rodamientos”

Para los 3 casos que se van a estudiar el procedimiento que se ha realizado es el mismo, por tanto, los pasos expuestos a continuación se cumplen en todos los casos, solo se diferenciarán en el número de elementos tetraédricos de la malla y en el desorden de las fibras según el archivo .xml:

- **En primer lugar:** se carga el archivo .inp creado en Abaqus, el archivo importado es un modelo estructural de la pieza donde aparecerá el número de elementos y nodos para realizar la malla estructural.

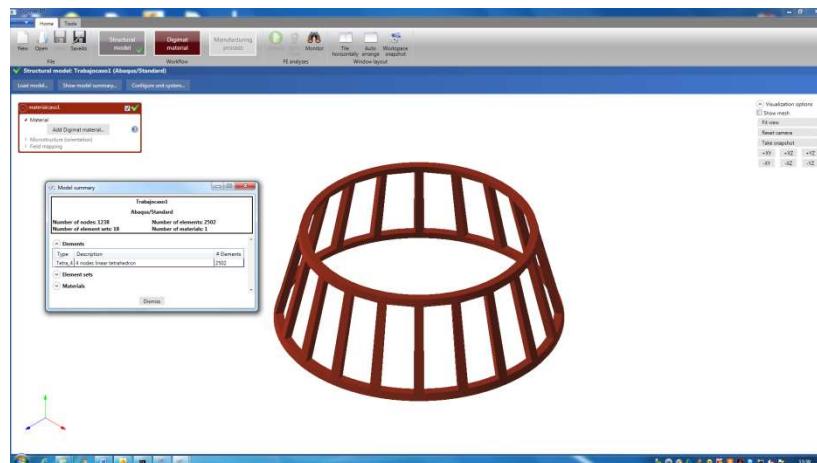


Figura 4.3.1

- **A continuación:** se carga el material Digimat, que tendrá que tener las mismas propiedades que el elegido tanto en Moldflow como en Abaqus, para ello habrá que fijarse en dos propiedades, el módulo de Young y coeficiente de Poisson y deberá tener el mismo porcentaje de fibra de vidrio.

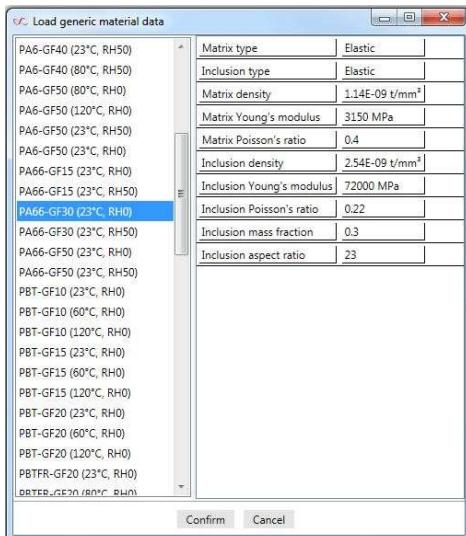


Figura 4.3.2



Figura 4.3.3

- **En tercer lugar:** se debe cargar el archivo .pat creado en Moldflow, el archivo importado está relacionado con el proceso de fabricación de la pieza, donde se podrá observar que el número de nodos y elementos es mucho mayor que en Abaqus ya que la precisión de la malla estructural para el moldeo por inyección es mayor.

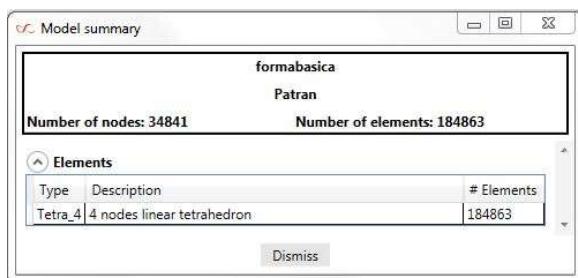


Figura 4.3.4

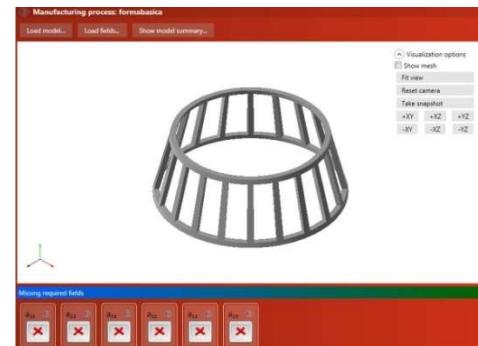


Figura 4.3.5

- **Por último:** se carga el archivo .xml procedente de Moldflow, en él se observa la orientación de fibra en las diferentes direcciones, cuanto mayor sea el número, mayor será el desorden de la fibra.

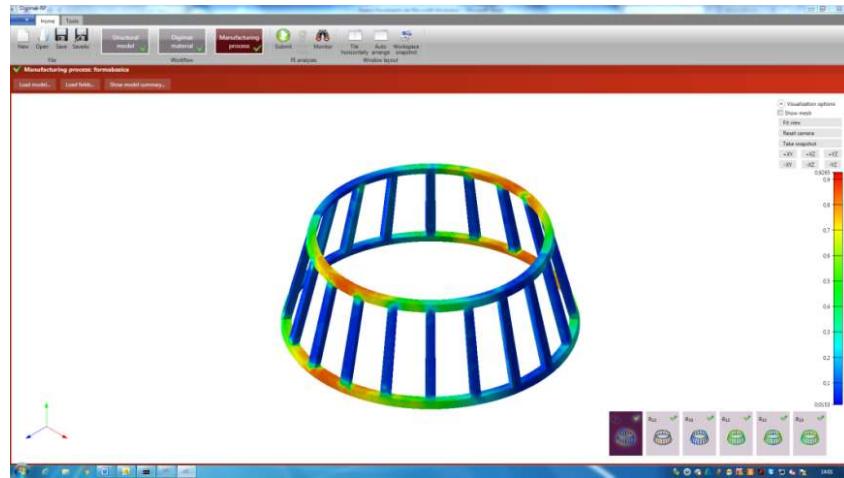


Figura 4.3.6

Cargando estos dos archivos procedentes de Moldflow (.pat y .xml), se consigue que se vuelquen los datos experimentales del proceso de fabricación sobre el material compuesto escogido en la base de datos de Digimat RP, cuyas características serán idénticas al elegido en el proceso de fabricación.

Con estos datos experimentales volcados sobre el material elegido, se consigue que en el material reforzado con fibra se tengan en cuenta aspectos como la anisotropía o el comportamiento térmico, que son influyentes en resultados como las deformaciones o tensiones de la pieza.

Esta información se crea en un fichero de extensión .mat donde se hace referencia a las propiedades de cada uno de ellos individualmente.

También a partir de este fichero de extensión se realiza una llamada al fichero de extensión .dof, que es el relacionado con la información relativa al tensor de orientación de la fibra en cada elemento de la malla de Abaqus

```

Archivo Edición Formato Ver Ayuda
MATERIAL
name = PA66
type = elastic
density = 1.14E-09
elastic_model = isotropic
Young = 3150
Poisson = 0.4

#####
MATERIAL
name = GF30
type = elastic
density = 2.54E-09
elastic_model = isotropic
Young = 72000
Poisson = 0.22

#####
PHASE
name = Matrix
material1 = PA66
type = matrix
mass_fraction = 0.7

```

Figura 4.3.7

Una vez cargados todos los archivos, procedemos al mapeo, gracias al uso de este programa se puede conseguir una mejor solución de las tensiones y deformaciones que sufrirá la pieza.

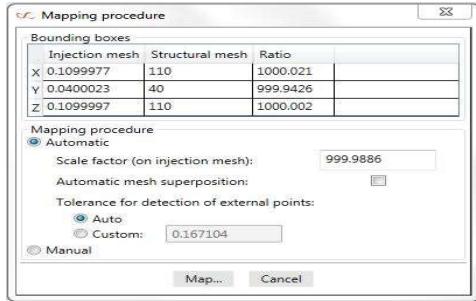


Figura 4.3.8

Quedando la solución definitiva, como la expuesta en la figura 4.3.9, para poder analizar los resultados una vez realizada la fusión entre el modelo estructural y el proceso de fabricación habrá que abrir la solución en Abaqus, ya que Digimat RP solo realiza el procedimiento necesario para tener en cuenta el proceso de fabricación y no olvidar propiedades de los materiales que afectan directamente sobre las tensiones o deformaciones de la pieza.

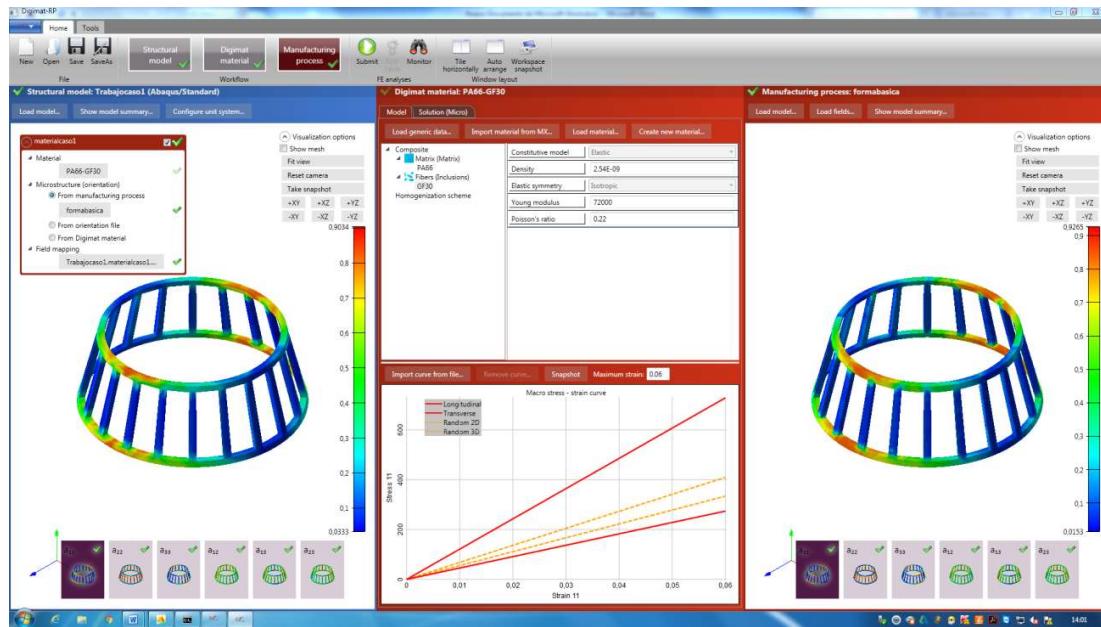


Figura 4.3.9

Por último, en los dos siguientes casos, lo único que se va a proceder es a mostrar los datos diferentes respecto al primer caso. Para este segundo caso, lo que se va a mostrar son dos figuras con los elementos y número de nodos de la malla estructural

realizada en Abaqus (Figura 4.3.10) y la malla realizada en el proceso de fabricación en Moldflow (Figura 4.3.11).

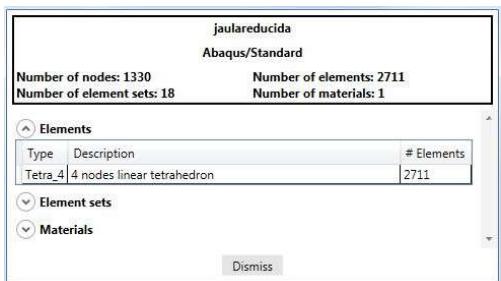


Figura 4.3.10

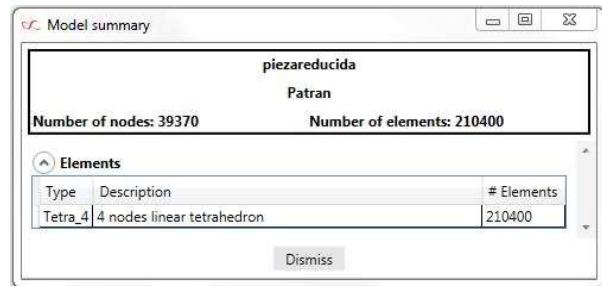


Figura 4.3.11

Ahora se realiza lo mismo pero para el tercer caso

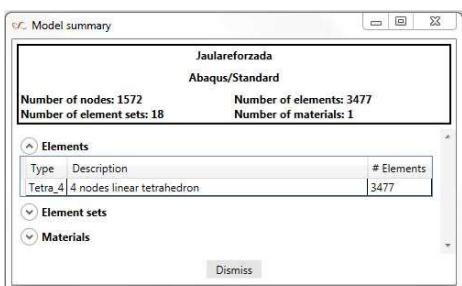


Figura 4.3.12

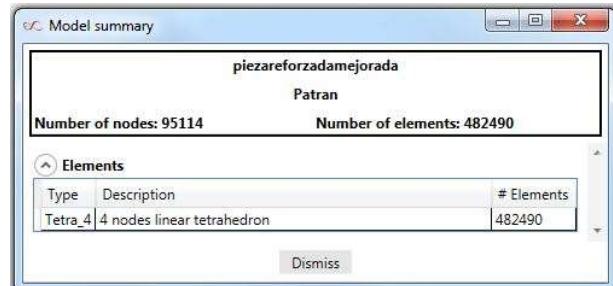


Figura 4.3.13

# Anexo 5: Abaqus

1. Que es Abaqus.....	118
2. Entorno de Abaqus.....	119
· Módulos	
3. Estudio “Jaula de alojamiento para rodamientos”.....	123
· Caso 1: Jaula original	
· Caso 2: Jaula con reducción de anchura de los travesaños	
· Caso 3: Ensamblaje entre jaula original y un refuerzo en el travesaño	

## 1. Que es Abaqus

Abaqus es un conjunto de programas de simulación que aplica el método de los elementos finitos para realizar cálculos estructurales estáticos lineales, no lineales y dinámicos.

Posee una extensa librería de elementos finitos que permiten modelar virtualmente cualquier geometría y una extensa lista de modelos que simulan el comportamiento de una gran mayoría de materiales.

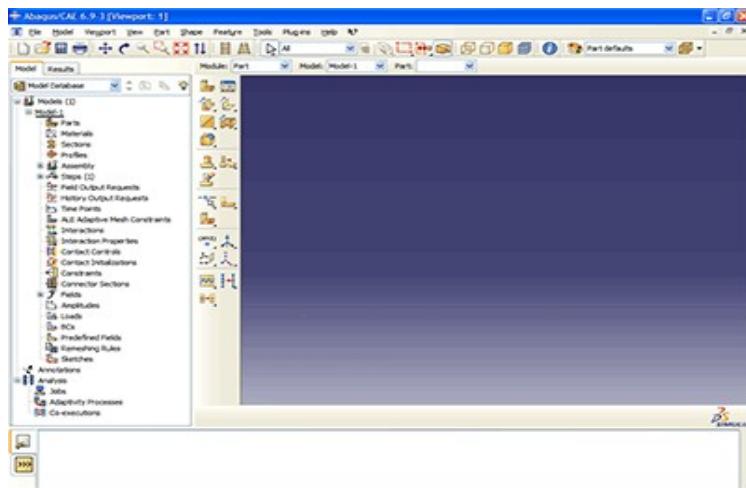


Figura 5.1.1

El software cuenta con 3 bloques básicos:

- **Pre-procesado o modelado:** este paso implica la creación de un archivo de entrada que contiene el diseño realizado para analizarlo mediante elementos finitos. Este paso también, se puede importar desde un programa de diseño 3D compatible.
- **Procesado o análisis de elementos finitos:** en este paso se produce un archivo de salida visual del modelo, en el que se habrán incluido todas las condiciones del proceso, tales como, materiales, fuerzas externas...
- **Post-procesado o generación de informe:** este último paso, es un paso de representación visual de los distintos resultados del modelo, tales como deformaciones, desplazamientos, esfuerzos...

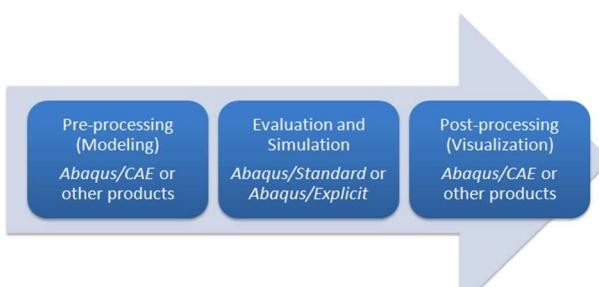


Figura 5.1.2

## 2. Entorno de Abaqus

El entorno de Abaqus se divide en:

- **Barra de título:** muestra la información referida al archivo en el que se trabaja y la versión de Abaqus utilizada.
- **Barra de menú:** se encuentran las distintas opciones de trabajo que tendremos disponibles para cada módulo, como “File”, “Model” o “View” entre otras.
- **Barra de herramientas:** brinda acceso rápido a opciones que se encuentran contenidas dentro de los distintos menús, pueden ser personalizadas.
- **Caja de herramientas:** se encuentran los botones de acceso rápido a las distintas herramientas disponibles para el modulo en el que se está trabajando.
- **Barra de contexto:** permite navegar por los distintos módulos que posee Abaqus y por las distintas funcionalidades de cada uno, por ejemplo, en el módulo “Part”, permite navegar por los distintos modelos y las distintas geometrías.
- **Árbol de modelo:** organizan toda la información contenida en el modelo para permitir una vista y edición rápida de la misma, como también permite navegar en distintos modelos, en la pestaña “Model” se encuentra el diagrama de árbol referido al modelo en sí, pudiendo trabajar con más de uno, mientras que en la pestaña “Results” se puede trabajar con distintos archivos de resultados de análisis.
- **Ventana de trabajo:** ventana que muestra una determinada vista de nuestro modelo. Abaqus permite trabajar con distintas vistas de manera simultánea, lo cual nos es útil, para visualizar distintos modelos a la vez.
- **Área de mensaje:** se muestran los mensajes de estado, advertencias y errores que se generan al ejecutar una determinada función.

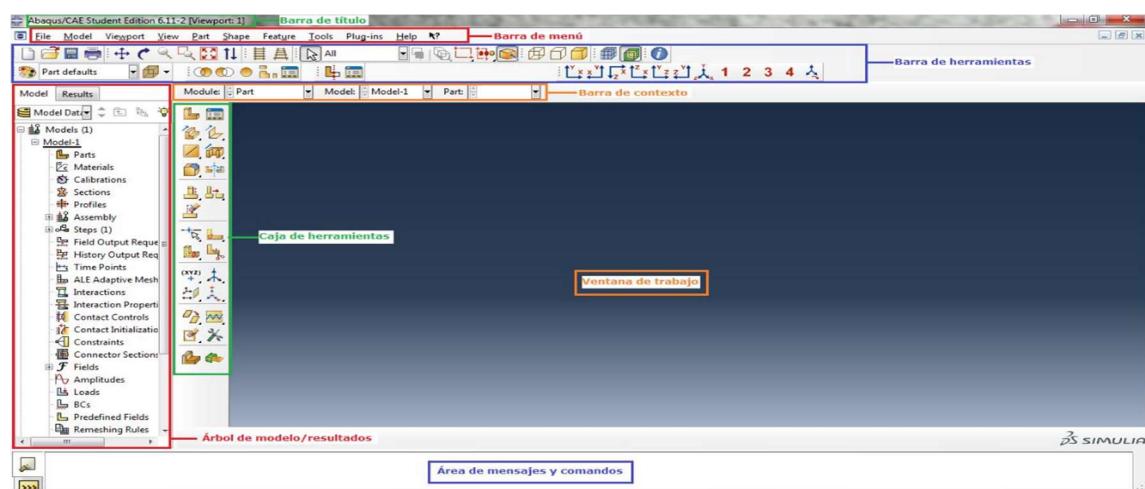


Figura 5.2.1

## • Módulos

A través de ellos se ejecutan las distintas funciones que se necesitan para la generación de un modelo y análisis del mismo mediante el método de elementos finitos. A continuación, se resumen los distintos módulos con sus principales funciones:

- **Módulo “Part”**: permite la creación de partes individuales a partir del dibujo la importación de una geometría generada con otro programa. Al crear una parte, Abaqus permite crearlo en 3D, 2D o axial simétrico (simetría alrededor de un eje).

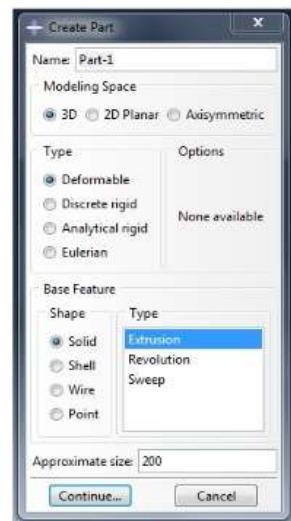


Figura 5.2.2

- **Módulo “Property”**: módulo para asignar secciones y materiales a cada parte del dibujo, generar los perfiles para secciones de viga o definir las orientaciones para las distintas secciones. En cuanto a los materiales, también se deben definir las propiedades del mismo que serán necesarias para el análisis a realizar (Figura 5.2.3).

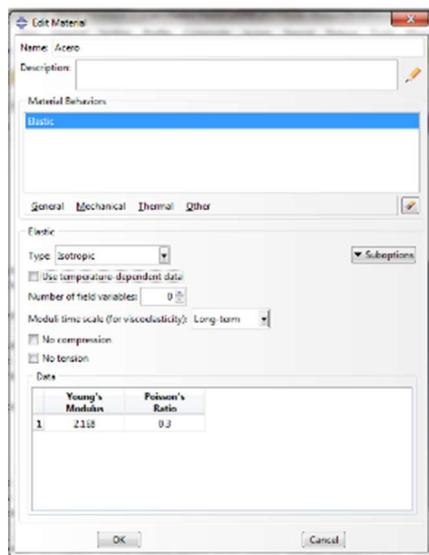


Figura 5.2.3

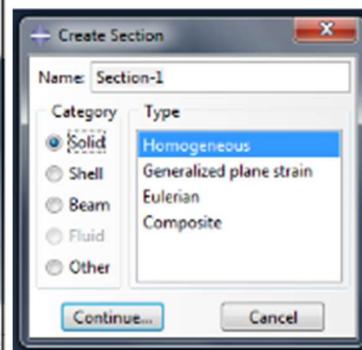


Figura 5.2.4

- **Módulo “Assembly”**: en este módulo se crean y ensamblan las “instances” (subdominios que componen el problema). Si se trabaja con un modelo en el cual se presenta varias veces la misma pieza, no es necesario generar una parte para cada una de ellas, sino que Abaqus permite crear una misma parte y luego ensamblarla.

La malla se puede hacer en la parte o en el modelo ensamblado. En el primer caso, la malla es de tipo dependiente y todas las veces, la parte ensamblada tendrá la misma malla. En el segundo caso, la malla es de tipo independiente, significa que por más que se ensamble una parte, puede generarse una malla distinta para cada una de ellas (Figura 5.2.5).

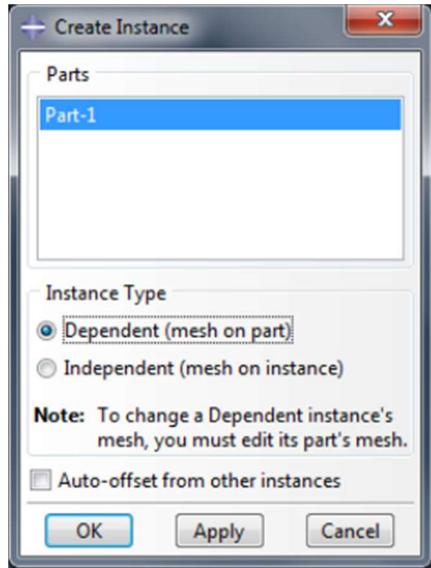


Figura 5.2.5

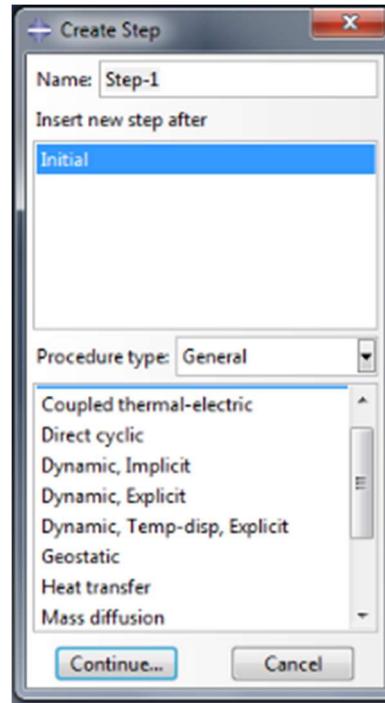


Figura 5.2.6

- **Módulo “Step”:** permite generar y definir los distintos estados de carga y las variables asociadas a los mismos que se incluirán en los resultados. Pueden generarse de manera secuencial o superponerse.

Se clasifican en función del tipo de procedimiento, por ejemplo, se puede configurar un análisis estático dinámico de transferencia de calor o un análisis de perturbación lineal de frecuencia entre otros (Figura 5.2.6).

- **Módulo “Interaction”:** módulo para especificar interacciones entre distintas regiones del modelo. Por ejemplo, interacciones de contacto, de radiación hacia un ambiente...

Para crear una interacción, primero se debe crear la propiedad de dicha interacción (Figura 5.2.7) y luego se debe seleccionar un estado de carga compatible (Figura 5.2.8).

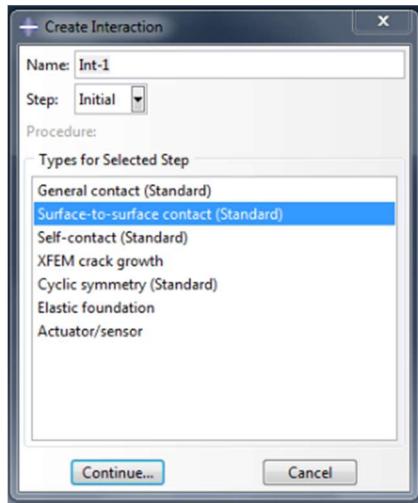


Figura 5.2.7

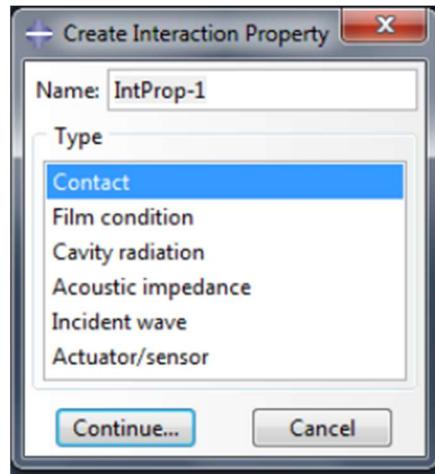


Figura 5.2.8

- **Módulo “Load”:** en este módulo se crearan las cargas, condiciones de carga y campos que se aplicaran en cada estado de carga. Todos ellos dependen del tipo de step.

Respecto a las condiciones de carga, hay por ejemplo, condiciones de rotación, velocidad o temperatura entre otras. Por el contrario, para las cargas, hay por ejemplo, cargas de presión o fuerzas concentradas, que tienen gran variedad de amplitud, ya que pueden variar linealmente o según funciones trigonométricas entre otras (Figura 5.2.9).

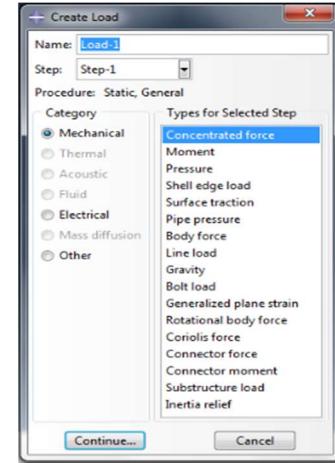


Figura 5.2.10

- **Módulo “Mesh”:** permite la generación de la malla de elementos finitos en el modelo. Para definirla, se deben seleccionar opciones como el tipo de elemento (elementos de viga, barra...), el tipo de interpolación (lineal o cuadrática), el tamaño de elemento y la técnica de mallado.
- **Módulo “Optimization”:** crea y configura una tarea de optimización, por ejemplo, ejecutar un análisis para remover material de una determinada sección en busca de un peso o espesor determinado.
- **Módulo “Job”:** sirve para crear, ejecutar y monitorear los distintos análisis sobre el modelo que se trabaja, dando cada análisis un archivo de resultados.
- **Módulo “Visualization”:** permite la visualización de los resultados, se pueden observar diagramas de tensiones, deformaciones o cualquier otra variable añadida al análisis.

### 3. Estudio “Jaula de alojamiento para rodamientos”

Para los 3 casos que se van a estudiar el procedimiento que se ha realizado es el mismo, por tanto, los pasos expuestos a continuación se cumplen en todos los casos, solo se diferenciaran en la geometría a trabajar.

- **Primer paso:** se importa la pieza sobre la que se va a trabajar en formato .step creado anteriormente en un programa de diseño 3D, en este caso concreto, en SolidWorks.

Una vez que importamos la pieza a Abaqus, se tendrá que elegir el material Ultramid A3WG6 (Figura 5.3.1), que fue el elegido en Moldflow y trasvasamos los datos de dos propiedades mecánicas, el módulo de Young (11300 MPa) y el coeficiente de Poisson (0.38).

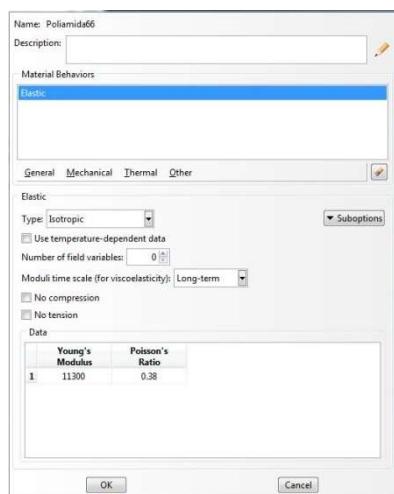


Figura 5.3.1

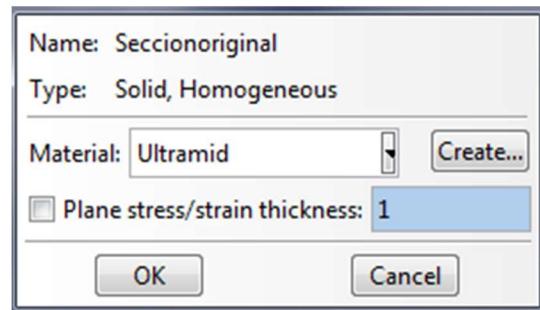


Figura 5.3.2

- **Segundo paso:** tras elegir el material, se deberá seleccionar la sección, que será sólida y homogénea, por tanto se hará referencia únicamente al material y a la relación esfuerzo plano/deformación plana (Figura 5.3.2). Por último, se deberá asignar la sección creada a la jaula.

- **Tercer paso:** ahora se debe realizar el ensamblaje del modelo, en principio, si se tienen muchas partes cada una de ellas tendrá su propio sistema de coordenadas e independiente del resto, pero mediante la función instances se pueden poner todas las partes en función de un sistema global de coordenadas. Para este caso en concreto, al solo tener una parte, el origen de coordenadas coincidirá con el del sistema global de coordenadas.

Por consiguiente, con crear una única instance sobrara para crear el propio modelo (Figura 5.3.3).

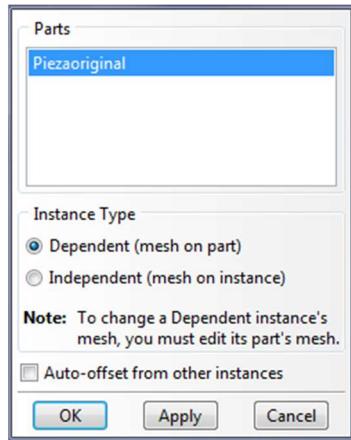


Figura 5.3.3

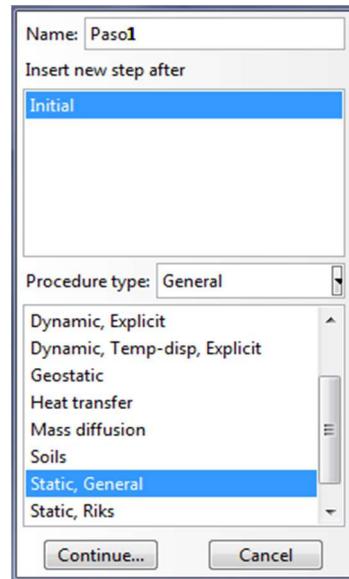


Figura 5.3.4

- **Cuarto paso:** en este momento lo que se debe crear son los pasos para el análisis, habrá un paso inicial creado automáticamente donde se aplicarán las condiciones de carga y un primer paso estático general que se debe crear (Figura 5.3.4) donde se aplicarán las cargas necesarias para la jaula.

También, una vez creado los distintos pasos, se pueden seleccionar las variables de salida que se verán en resultados, en este caso seleccionaremos las salidas por defecto.

- **Quinto paso:** aquí se crearan las condiciones de carga, que será un empotramiento en el anillo de mayor diámetro (Figura 5.3.5) y las cargas, que será una presión de 3 MPa en la parte interior de la jaula (Figura 5.3.6).

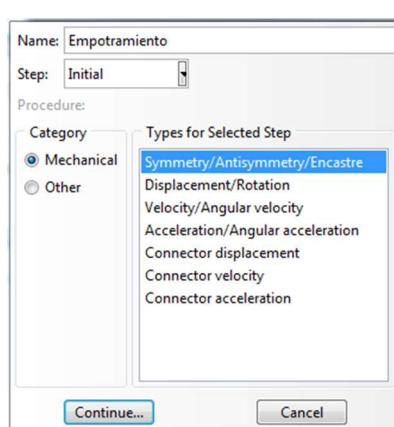


Figura 5.3.5

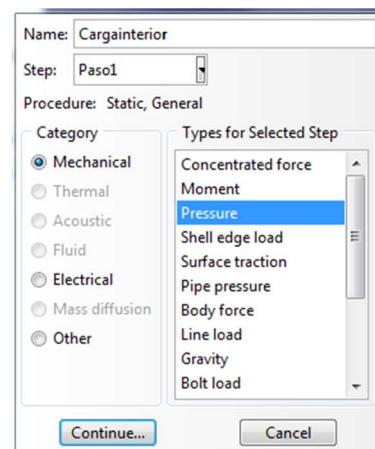


Figura 5.3.6

Quedando la solución de todas las condiciones de carga y carga sobre la jaula como las vistas en la figura (5.3.7).

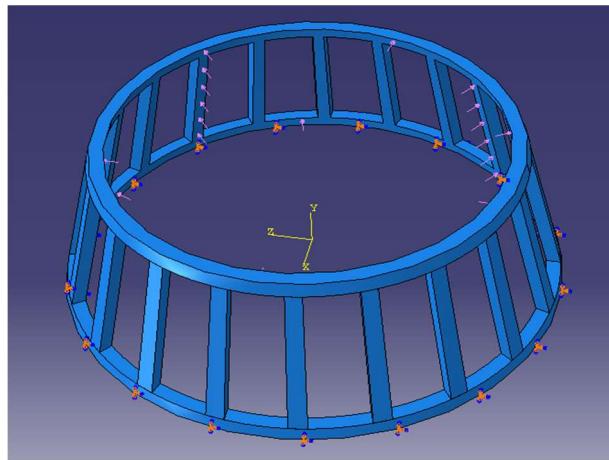


Figura 5.3.7

- **Sexto paso:** se procederá al mallado de elementos finitos, para el mallado seleccionaremos el tamaño (Figura 5.3.8), más pequeño cuanto mayor exactitud se quiera y el tipo de elemento de la malla, siendo para esta pieza un elemento tetraédrico (Figura 5.3.9).

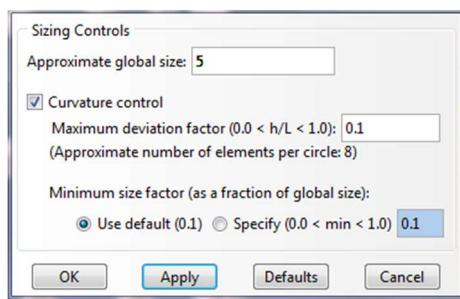


Figura 5.3.8

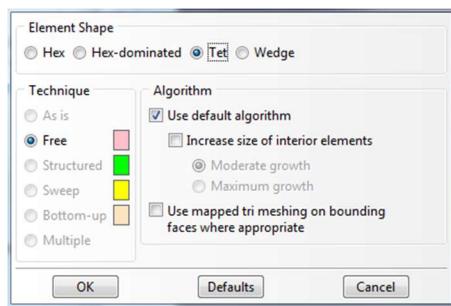


Figura 5.3.9

Una vez realizado el sexto paso, se procede a mallar la pieza, quedando la solución como la expuesta en la Figura 5.3.10, donde con ese tamaño de malla se han creado 2601 elementos como pone en la barra de comentarios.

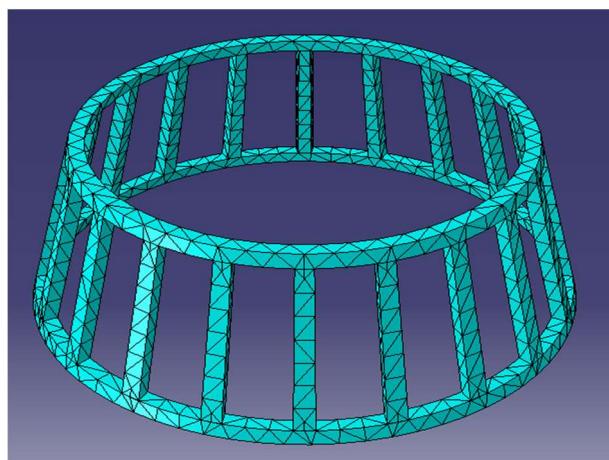


Figura 5.3.10

- **Séptimo paso:** una vez que ya se ha configurado el análisis, se procede a crear un trabajo asociado con el modelo para poder someterlo a dicho análisis (Figura 5.3.11), cuando termine sin ningún problema la creación del trabajo ya se pueden visualizar todas las variables seleccionadas o las que aparecen por defecto como por ejemplo, deformaciones o tensiones.

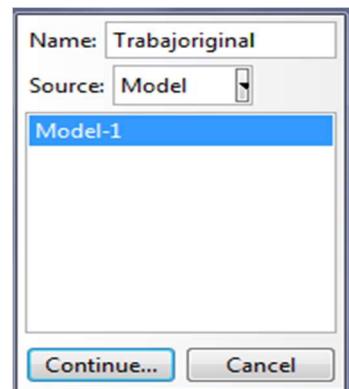


Figura 5.3.11