

## INDICE DE ANEXOS

Anexo I. Moldflow.....	1
Anexo II. Abaqus.....	21
Anexo III. Digimat.....	29
Anexo IV. Análisis del componente al que ha sido aplicada la metodología.....	37

## ANEXO I. MOLDFLOW

Autodesk Moldflow es un programa del tipo CAE diseñado para realizar la simulación de diversas técnicas de inyección, pudiendo así evaluar aspectos fundamentales del proceso de moldeo. Esto resulta muy ventajoso en el proceso de diseño de moldes ya que reduce lo que posiblemente serían numerosas pruebas de ensayo y error en máquina, necesarias para la obtención de la configuración óptima del proceso de moldeo.

El programa en cuestión será utilizado durante este trabajo para la realización del análisis reológico de la pieza, con el objetivo de obtener la información relativa a la orientación de la fibra en el material. Dicha información será transferida, a través del programa DIGIMAT, a la malla de ABAQUS donde estudiaremos finalmente la pieza con todas las cargas que le son aplicadas y toda la información del material ya particularizado.

MOLDFLOW nos ofrece un conjunto de opciones para modelar la pieza de estudio geoméricamente. Sin embargo, estas herramientas de dibujo resultan insuficientes cuando la ésta es compleja. Es por ello que resulta adecuado el utilizar un software de dibujo 3D como ABAQUS para crear la geometría y posteriormente exportarlo a MOLDFLOW con formato .stl o .stp.

### ***Procedimiento***

Lo primero que tenemos que hacer al abrir el programa es crear un nuevo proyecto (*File -> New Project*) e importar el modelo de la pieza obtenido previamente con ABAQUS. Para ello pinchamos en *Import* y seleccionamos el fichero en cuestión.

Previo a la simulación de la inyección de una pieza, es necesaria la representación de ésta en elementos que permitan el análisis numérico de su proceso de moldeo. El método de los elementos finitos, es una de las técnicas que permiten el desarrollo de dicha discretización, resultando en lo se conoce como el mallado de la pieza. Diversos tipos de malla permiten la representación de una pieza, sin embargo el software de simulación Moldflow solo soporta tres tipos de mallado: el plano medio (midplane), el cascarón (Dual Domain) y el 3D; las dos primeras, formadas por elementos triangulares unidos por nodos, mientras la última, por elementos tetragonales unidos por nodos. La selección del más adecuado dependerá principalmente de factores como el espesor de la pieza y su complejidad geométrica, de las capacidades de cómputo de los equipos de simulación, del tipo de análisis a realizar, de los resultados disponibles y de interés para cada malla, y de la técnica de inyección evaluada. Para la pieza a la que le vamos a realizar el estudio elegiremos un mallado 3D.

Para terminar con el mallado sólo tenemos que pinchar en la opción *Mesh -> Generate Mesh* y fijar un determinado tamaño de malla. En nuestro caso ese tamaño es de

1.43mm, lo que provoca que nuestra malla esté dividida en 637670 elementos. Cada vez que queramos cambiar el tamaño de nuestra malla debemos asegurarnos de eliminar la malla anterior teniendo activada la opción *Remesh already meshed parts of the model*.

Tras esto deberemos verificar la calidad de la malla. Primero comprobaremos que no haya ningún elemento que intersecan, ya sea coplanarios o no. Seleccionamos *Mesh -> Mesh Diagnostics -> Overlapping Elements Diagnostic -> Show*. En nuestro caso la pieza no presenta ningún elemento anómalo.

También es fundamental comprobar que el eje Z que define la pieza está alineado en la perpendicular de la pantalla. Esto es necesario para que el programa pueda obtener de forma correcta la fuerza de cierre necesaria utilizada en el molde en la fabricación de la pieza. Si la pieza no se encontrase alineada con respecto al eje Z deberíamos pinchar en la opción *Mesh -> Utilities -> Modeling Rotate*, seleccionamos la pieza, el eje sobre el que la queremos rotar y el ángulo necesario para que quede bien orientada.

Una vez la pieza ha sido mallada correctamente se deben de crear los canales de alimentación por donde el material va a ser inyectado. En este trabajo se dan dos diferentes configuraciones de entrada de material en la pieza. En la primera de ellas el material es inyectado en el lateral de la pieza directamente por un único punto de inyección, sin necesidad de diseñar ningún canal de alimentación. En la segunda configuración el material es introducido a partir de una mazarota principal, por donde se inyecta éste, que deriva en tres canales fríos.

Para la creación de estos canales de la segunda configuración procedemos de la siguiente manera:

Primero creamos los nodos correspondientes a la entrada de la pieza y el nodo central. Esto podemos hacerlo con la opción *Geometry -> Nodes -> Node by Coordinates*. El único nodo que nos quedará por crear será el nodo inicial de la mazarota, es decir, por donde el material es inyectado. Lo hacemos con la opción *Node by offset*, con la que podemos indicar el desplazamiento a aplicar en el nodo central creado antes. Este desplazamiento será la longitud de la mazarota. Ahora sólo nos quedará unir estos nodos con la opción *Beam*, donde tendremos que asignarle a cada canal la propiedad de canal frío e indicar que su sección será circular, escribiendo su diámetro. Una vez acabados todos los canales deberemos indicar cuál es el punto de inyección con la opción *Set Injection Locations* de la sección de *Study Tasks*.

Antes de ejecutar el análisis conviene señalar que en esta pieza no se ha creado sistema de refrigeración al ser ésta tan pequeña que no es requerido, pero en otras piezas ahora sería el turno de modelar el sistema de refrigeración. Se puede diseñar siguiendo las mismas instrucciones que con los canales de alimentación pero asegurándonos que las propiedades son idóneas para el paso de refrigerante y no para la alimentación de la pieza. Por último indicaríamos, a través de *Set Coolant Inlets* los puntos de entrada del refrigerante, debiendo indicar con anterioridad de qué tipo de refrigerante se trata y otras propiedades como su temperatura.

En resumen, para proceder con el análisis del modelo deberemos introducir una serie de datos de entrada:

- La geometría de la pieza, de los canales de alimentación y del sistema de refrigeración. La pieza será importada desde un archivo ya existente, pero tanto los canales de alimentación como la refrigeración debemos de dibujarla nosotros en el propio programa MOLDFLOW siempre que sea necesario.
- El material del que va a estar hecha nuestra pieza, escogido de una amplia base de datos que posee el propio programa, y diferentes datos de propiedades correspondientes a este material.
- Parámetros del proceso tales como temperaturas de inyección y compactación (recomendadas para cada material), tiempos (inyección, compactación, refrigeración...), o presión de compactación. MOLDFLOW nos ofrece una serie de características para cada uno de los materiales del catálogo, lo que nos sirve de gran ayuda para la elección de los diferentes parámetros del proceso.

Tras el análisis MOLDFLOW nos da la opción de poder visualizar una lista de resultados que pueden agruparse dependiendo de las siguientes características:

- Resultados relacionados con la factibilidad: este grupo engloba el llenado de la pieza, temperatura en el frente de flujo, la presión de inyección, la fuerza de cierre y la contracción volumétrica.
- Resultados relacionados con el control del proceso: aquí encontramos la evolución de la presión, temperatura y capa fría a lo largo del tiempo.
- Resultados relacionados con la calidad: aquellos defectos como líneas de soldadura, atrapamientos de aire y rechupes.
- Resultados relacionados con el comportamiento mecánico: veremos en este grupo la información relativa a deformaciones, tensiones residuales, la orientación del flujo y la orientación de la fibra, siendo este último el resultado más importante dentro de nuestro estudio.

## Resultados

En esta sección del anexo veremos todos los resultados que han sido relevantes en el estudio un poco más detenidamente:

- **1PP20**

### Tiempo de llenado

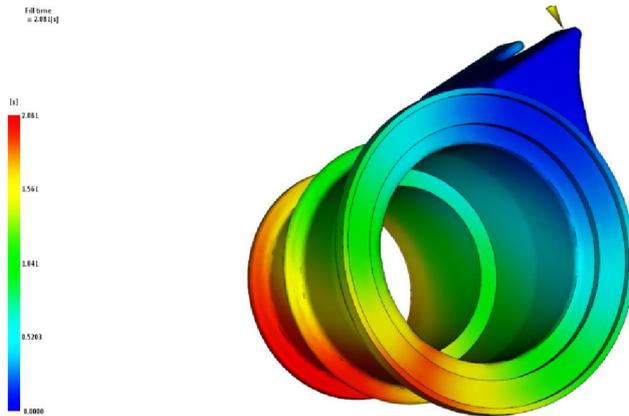


Figura AI.1. 1PP20 Llenado

Como podemos ver en la imagen, la pieza se llena por completo en unos 2 segundos, como en todos los casos ya que es un dato que hemos fijado para todo el estudio. La línea de colores de la izquierda y la propia figura nos dan una idea del llenado de la pieza frente al tiempo. El instante inicial correspondería al color azul e iría avanzando hasta llegar al color rojo, que es donde finaliza el llenado.

Vemos como el material avanza desde el punto de inyección, recorriendo toda la circunferencia de la pieza, para acabar juntándose en el extremo opuesto de ésta.

### Presión de inyección

En la imagen se observa la distribución de la presión de inyección a lo largo de la pieza. Ésta es más elevada en el punto de inyección del material, llegando hasta casi los 9MPa, y va disminuyendo hasta ser nula en el punto donde finaliza el llenado. Esto es debido a que la presión necesaria para introducir el material es aplicada en el punto de inyección. La presión obtenida es baja y no presenta ningún problema para la pieza.

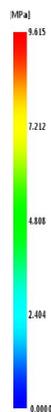


Figura AI.2. 1PP20 Presión de inyección

### Temperatura en el frente de flujo

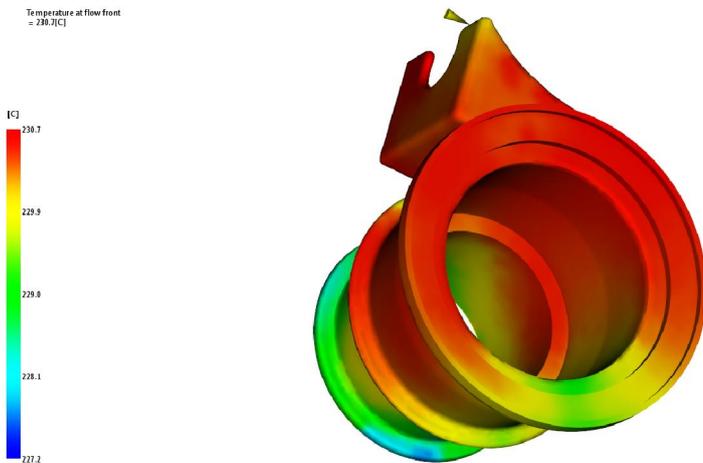


Figura A1.3. 1PP20 Temperatura en el frente de flujo

estaría en unos 8°C. El valor de la temperatura será un dato que dependerá del material, ya que es una condición del proceso de inyección que hemos tenido que introducir para cada material.

Se trata de la variación de temperatura en los dos segundos que dura el tiempo de llenado. Al igual que instintivamente asociaríamos, el color rojo de la figura significa una mayor temperatura y el azul la menor. La temperatura va disminuyendo al igual que el llenado debido a que el material se va enfriando a medida que avanza por la pieza. La variación de la temperatura entre el inicio (227°C) y en el final del llenado (230°C) es de 3°C, lo que significa que está dentro del rango permitido para trabajar, que

### Fuerza de cierre

En la gráfica se observa cómo va aumentando la fuerza de cierre con el paso del tiempo. Este aumento es progresivo y constante hasta que el tiempo se acerca al final de llenado. A partir de ahí la fuerza de cierre se ve incrementada considerablemente desde la tonelada hasta las 2 toneladas. Este valor es bastante pequeño ya que las máquinas convencionales pueden alcanzar fuerzas de cierre hasta 4000 toneladas.

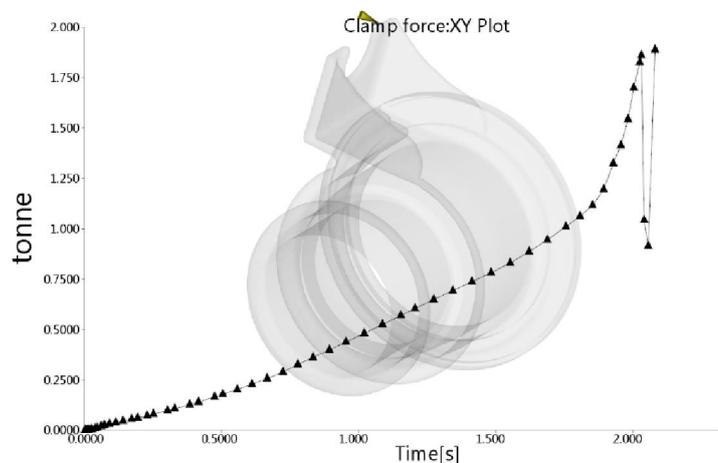


Figura A1.4 1PP20 Fuerza de cierre

### Atrapamientos de aire

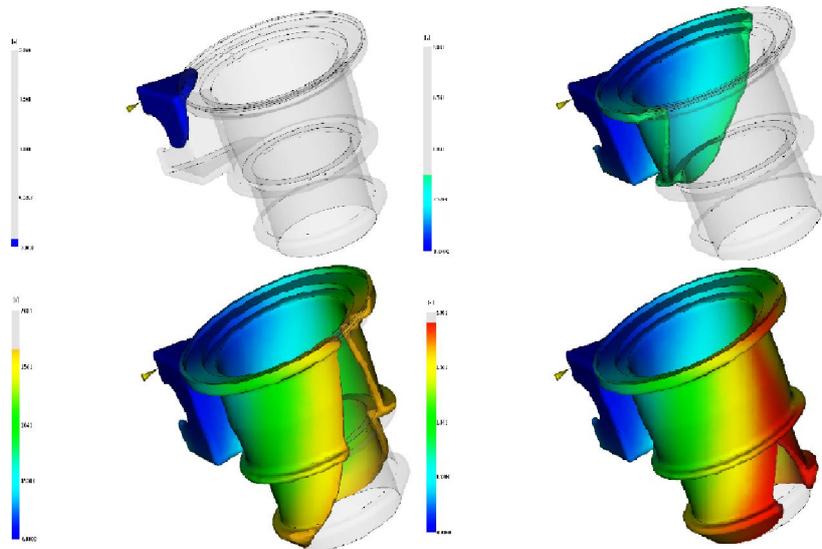


Figura A1.5 Avance del llenado con una entrada

En la imagen superior se muestra el avance de material en distintos instantes de tiempo, lo cual nos ayuda a entender mejor cómo es el llenado de la pieza. En la parte inferior derecha podemos apreciar la fase final del llenado, en la cual no se observan atrapamientos de aire.

### Tensor de fibra

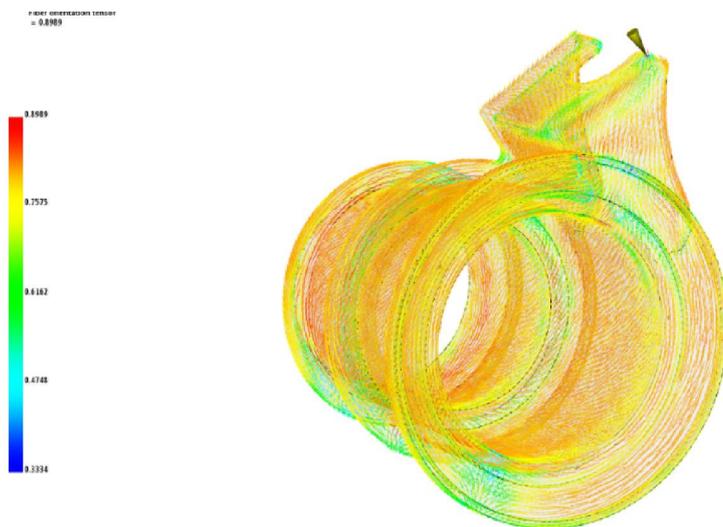


Figura A1.6. 1PP20 Orientación de fibra

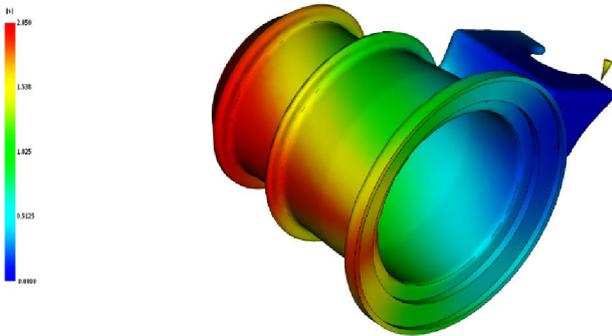
En la imagen se aprecia la pieza pintada de diferentes colores, dependiendo de la zona de la que se trate. A la izquierda de esta una escala de colores, que va de 0 (azul) a 1 (rojo). Cuanto mayor sea la probabilidad de que las fibras estén alineadas con respecto a la dirección principal, el valor de la orientación de fibra va a ser más cercano a 1, con lo que en la pieza estará dibujado en un color rojizo. En este caso la escala nos indica que el valor mínimo está en

0.33 y el máximo en 0.9, aunque como se aprecia en la figura, la mayoría de la pieza se

encuentra en valores de orientación de fibra en torno a 0.75, lo que indica que hay una alta probabilidad de que la fibra se encuentre alineada.

- **1PP50**

Tiempo de llenado



Aunque hayamos cambiado el porcentaje de fibra en el material, la distribución del material en el llenado es el mismo, siendo éste completo. De ahora en adelante, al ser el llenado idéntico para esta configuración, solamente se mostrará una imagen de este para cada uno de los casos.

Figura A1.7. 1PP50 Llenado

Presión de inyección

Aumentar el porcentaje de fibra en el material provoca que la presión de inyección aumente también hasta los 12MPa, frente a los 9MPa que teníamos con un 20% en fibra.

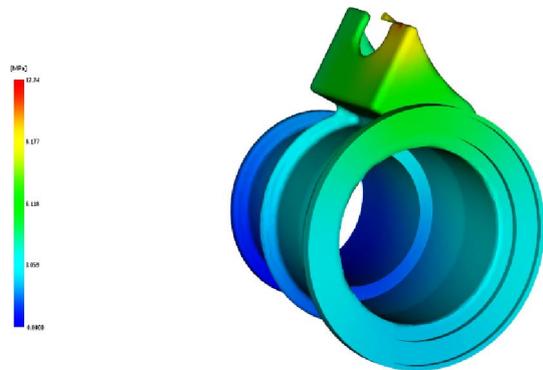
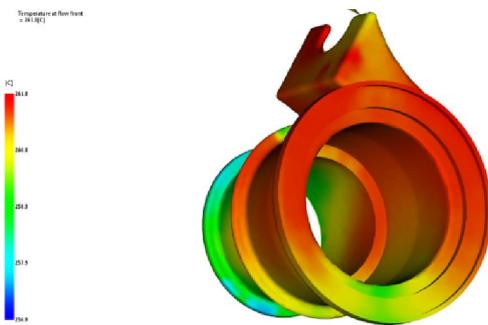


Figura A1.8. 1PP50 Presión de inyección

Temperatura en el frente de flujo



Ni la distribución ni la variación de temperatura apenas se ha visto afectada por el cambio en el porcentaje de fibra. Además los valores de la temperatura también son iguales.

Figura A1.9. 1PP50 Temperatura en el frente de flujo

### Fuerza de cierre

La evolución de la fuerza de cierre es la misma pero su valor ha aumentado de 2MPa a 3MPa.

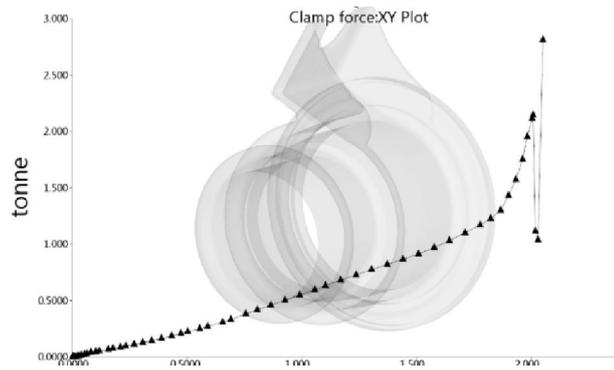


Figura A1.10. 1PP50 Fuerza de cierre

### Tensor de fibra



Vemos como la pieza está en un tono más rojizo que en el caso anterior, acercándose al valor máximo (0.93). Esto se debe a que a mayor porcentaje de fibra mayor cantidad de fibras y por lo tanto mayor también la posibilidad de que estas estén alineadas.

Figura A1.11. 1PP50 Orientación de fibra

- **1PA20**

### Tiempo de llenado

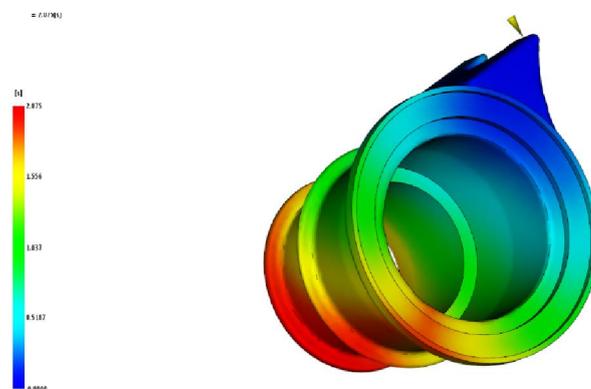
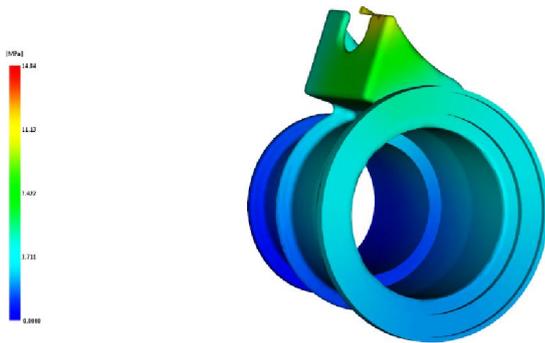


Figura A1.12. 1PA20 Llenado

### Presión de inyección



Vemos como la presión de inyección es más alta utilizando la poliamida que el polipropileno (14MPa frente a 9MPa) para un mismo porcentaje de fibra. Esto puede ser debido a que la poliamida tiene una mayor viscosidad, por lo que el material tendrá más resistencia a al avance al ser inyectado.

Figura A1.13. 1PA20 Presión de inyección

### Temperatura en el frente de flujo

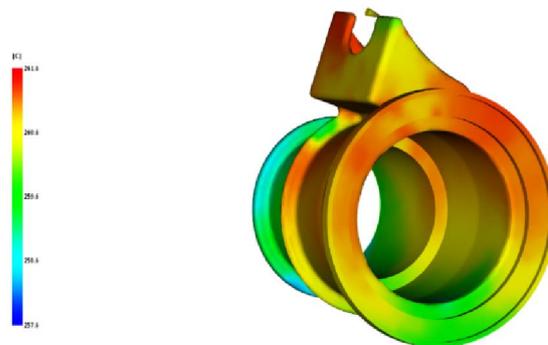
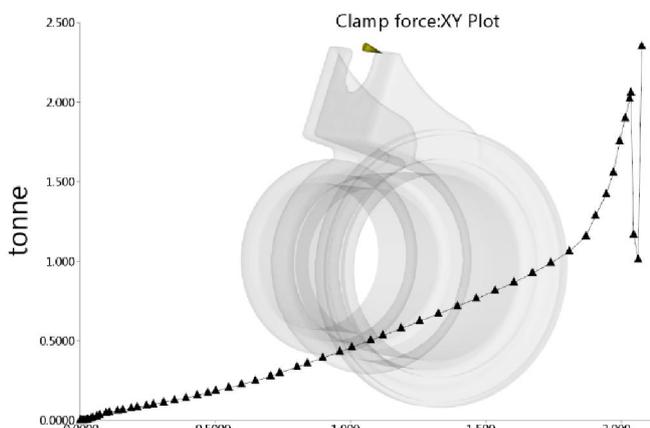


Figura A1.14. 1PA20 Temperatura en el frente de flujo

La variación de la temperatura en el frente de flujo aumenta 1°C con respecto al polipropileno, debido posiblemente a su mayor viscosidad, pero no es un cambio destacable.

### Fuerza de cierre



La fuerza de cierre es ligeramente más elevada que en el caso del polipropileno con un 20% en fibra ya que en el instante final del llenado llega hasta los 2.5MPa.

Figura A1.15. 1PA20 Fuerza de cierre

### Atrapamientos de aire

Para un mismo llenado, la forma de los atrapamientos de aire será la misma. En este caso se ha ilustrado en el caso del polipropileno con un 20% en fibra.

### Tensor de fibra

Al cambiar el material a la poliamida hemos aumentado la posibilidad de que la fibra se encuentre desalineada o desordenada. En este caso este valor sería de en torno a 0.65.

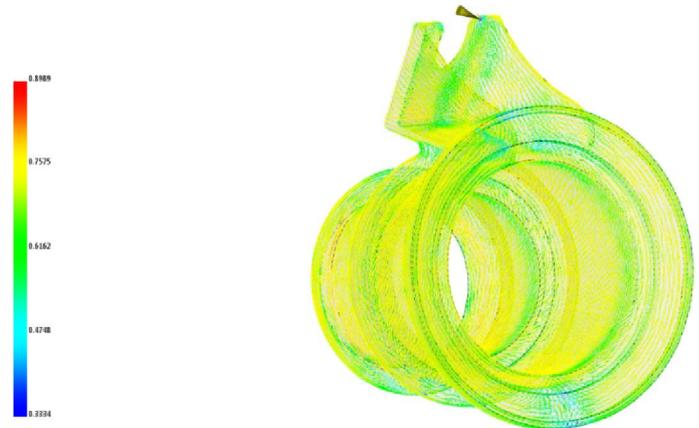


Figura AI.16. 1PA20 Orientación de fibra

## • 1PA50

### Tiempo de llenado

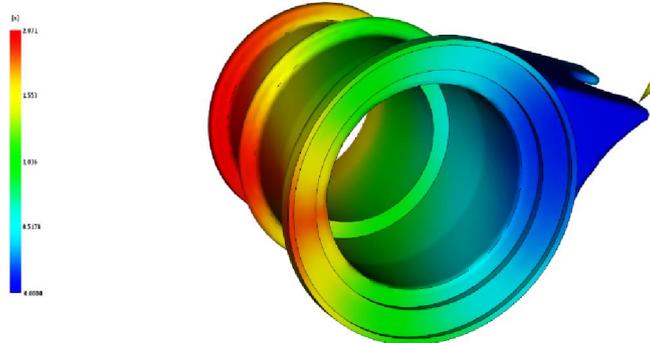


Figura AI.17. 1PA50 Llenado

### Presión de inyección

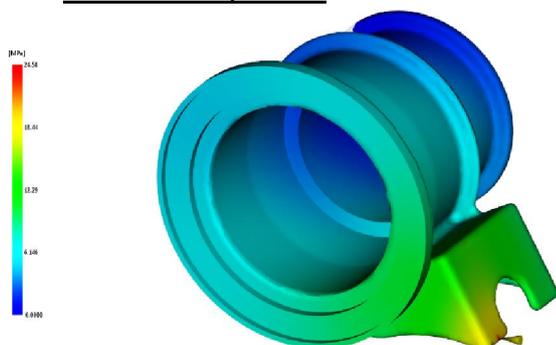


Figura AI.18. 1PA50 Presión de inyección

Como con el polipropileno, un aumento en el porcentaje de fibra provoca un incremento de la presión de inyección. Con la poliamida este incremento es aún mayor ya que alcanza los 24MPa, frente a los 14MPa con 20% fibra.

### Temperatura en el frente de flujo

En este caso el salto térmico ha aumentado considerablemente, ya que en el punto donde la temperatura es máxima esta es de 295°C y en donde es mínima de 285°C, lo que corresponde a una variación de temperatura de 10°C, una cifra que estaría cerca de no ser recomendada para la fabricación de la pieza. El material podría enfriarse en exceso durante la inyección y provocar la aparición de algún defecto.

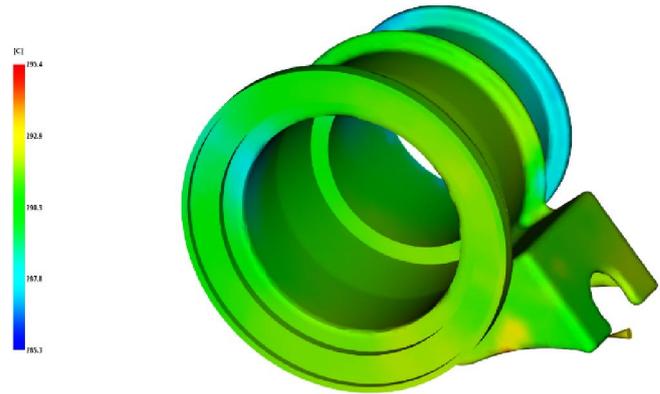


Figura A1.19. 1PA50 Temperatura en el frente de flujo

### Fuerza de cierre

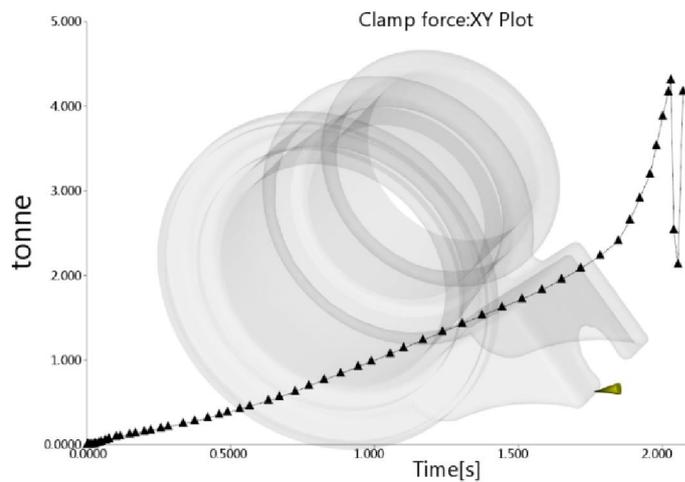


Figura A1.20. 1PA50 Fuerza de cierre

La fuerza de cierre es visiblemente más elevada que en todos los casos anteriores ya que al final del llenado sube de 2MPa hasta los 4,2 MPa.

## Tensor de fibra

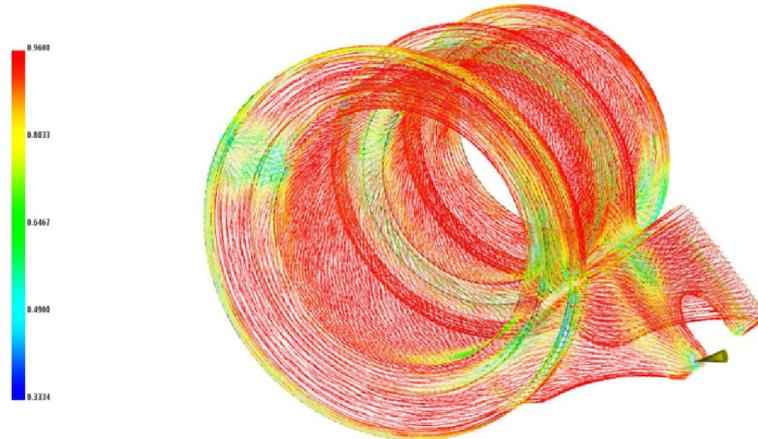


Figura A1.21. 1PA50 Orientación de fibra

Observamos que la poliamida, de igual forma que el polipropileno, al incrementar su porcentaje en fibra aumenta la probabilidad de que las fibras se encuentren orientadas con respecto a su dirección principal.

- **3PP20**

## Tiempo de llenado

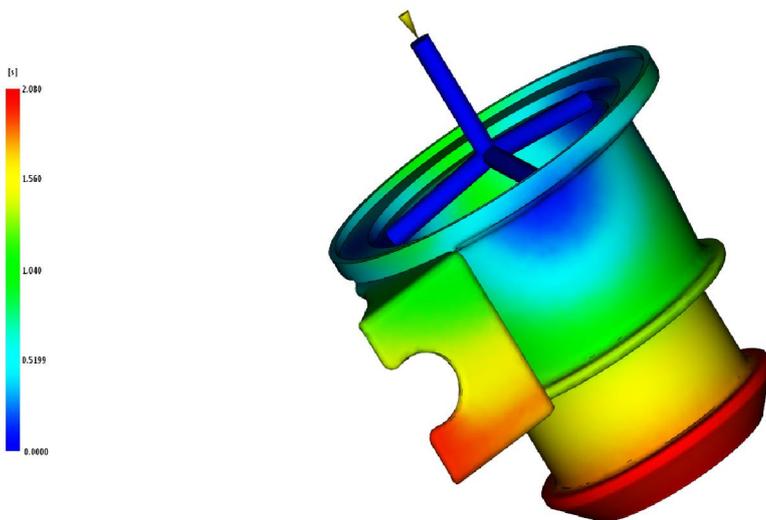


Figura A.22. 3PP20 Llenado

Hemos cambiado la configuración del llenado de la pieza. En este caso el material es introducido por tres canales de alimentación por uno de los extremos, como se puede ver en la figura. Al entrar por tres puntos en lugar de uno, el llenado es más uniforme ya que el material avanza simultáneamente, recorriendo toda la pieza y toda la parte inferior de la pieza termina de llenar a la vez.

### Presión de inyección

Los mayores valores de la presión de inyección se encuentran en los canales de alimentación, con un máximo de 8MPa. Esto beneficia el proceso ya que la pieza no sufre apenas de fuerza de presión de inyección, sino que los canales son los que aguantan la mayor parte. En la pieza la presión es muy baja, llegando a ser nula en el extremo opuesto al de llenado

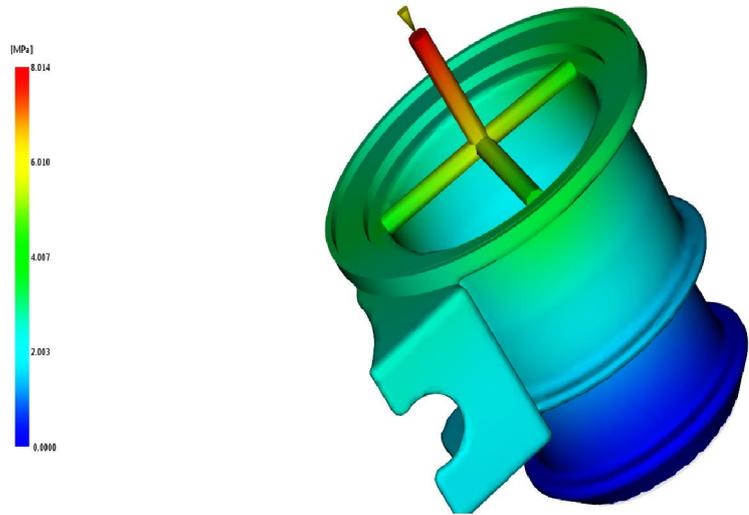
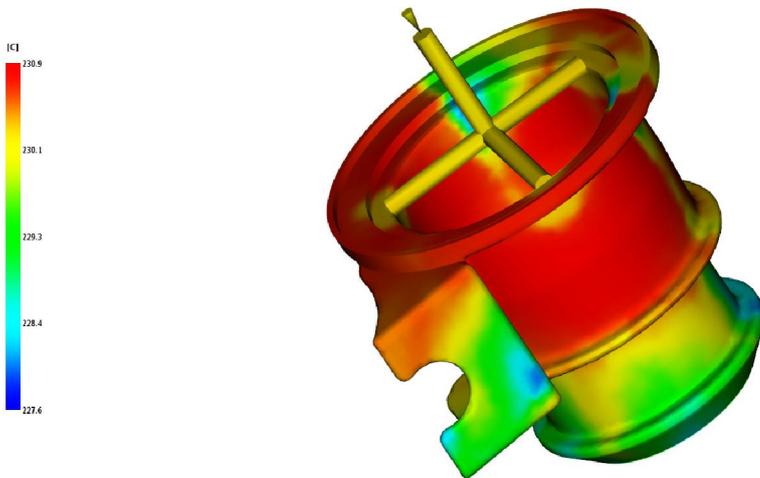


Figura A1.23. 3PP20 Presión de inyección

### Temperatura en el frente de flujo



Vemos como el cambio en la configuración de llenado a una con tres entradas no causa diferencias relacionadas con variación de la temperatura en el frente de flujo, ya que ésta sigue siendo de 3°C, como en el caso del polipropileno con un 20% fibra.

Figura A1.24. 3PP20 Temperatura en el frente de flujo

### Fuerza de cierre

La fuerza de cierre en el instante final no varía apenas al comparar los casos de una y tres entradas. Lo más destacable es el comportamiento de la fuerza de cierre durante todo el llenado ya que también aumenta de forma constante, pero en este caso su valor es mayor desde el inicio.

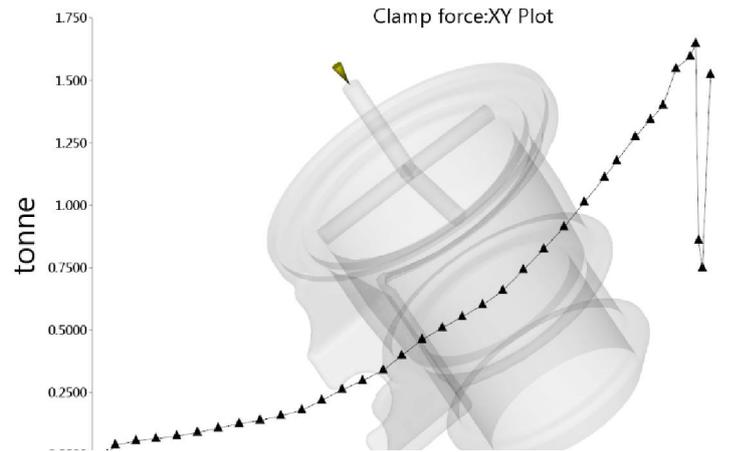


Figura A1.25. 3PP20 Fuerza de cierre

### Atrapamientos de aire

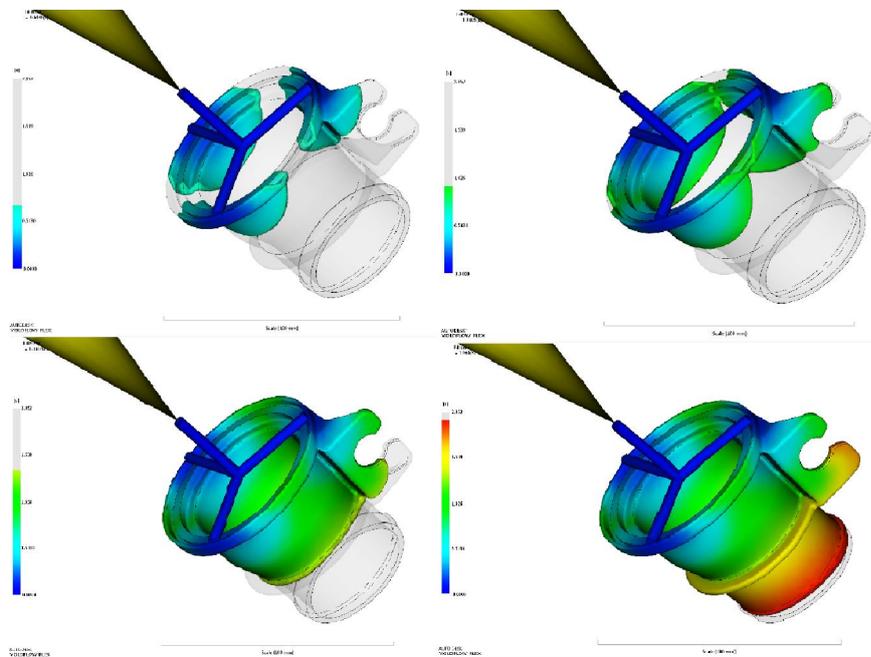


Figura A1.26. Avance del llenado con tres entradas

Con esta configuración de llenado no se produce ningún atrapamiento de aire. Esto es debido a que el llenado se hace de una forma progresiva y el material llega a todo el radio de la pieza simultáneamente gracias a los tres canales de alimentación. Así evitamos que esas zonas en las que se junta el material al acabar el llenado, como ocurre con la primera configuración de llenado.

### Tensor de fibra

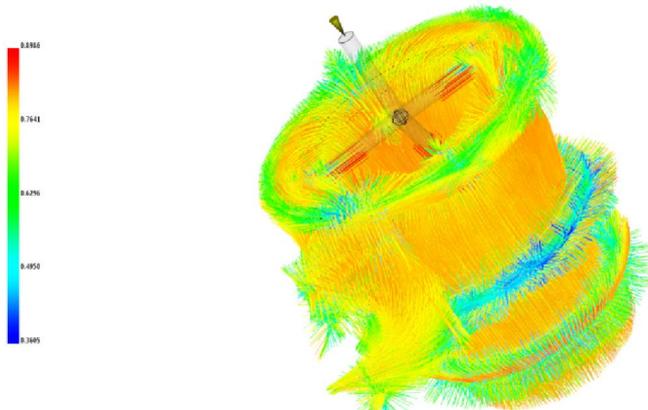


Figura A1.27. 3PP20 Orientación de fibra

Al modificar la configuración de llenado el cambio más significativo se encuentra en la dirección que sigue la fibra dentro del material. Para el modelo de una sola entrada veíamos cómo la fibra seguía la dirección circunferencial en la pieza pero con 3 entradas de material la fibra sigue la dirección longitudinal de la pieza. En cuanto a la probabilidad podríamos considerar que es similar en ambos casos.

- **3PP50**

### Tiempo de llenado

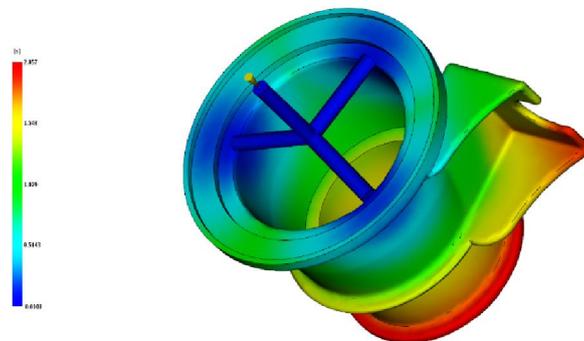


Figura A1.28. 3PP50 Llenado

### Presión de inyección

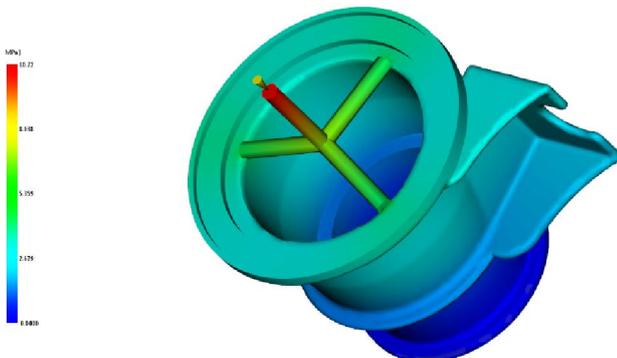


Figura A1.29. 3PP50 Presión de inyección

Aumentamos el porcentaje de fibra hasta 50%, y en consecuencia la presión de inyección aumenta ligeramente, hasta alcanzar los 10 MPa.

### Temperatura en el frente de flujo

La variación de temperatura sigue siendo de 3°C, lo que nos indica que sigue sin provocar variación alguna el aumento del porcentaje de fibra en el salto térmico.

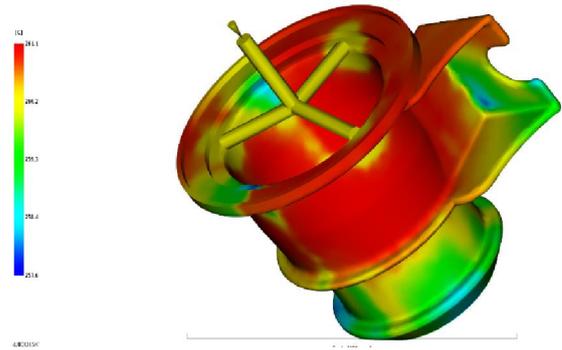


Figura A1.30. 3PP50 Temperatura en el frente de flujo

### Fuerza de cierre

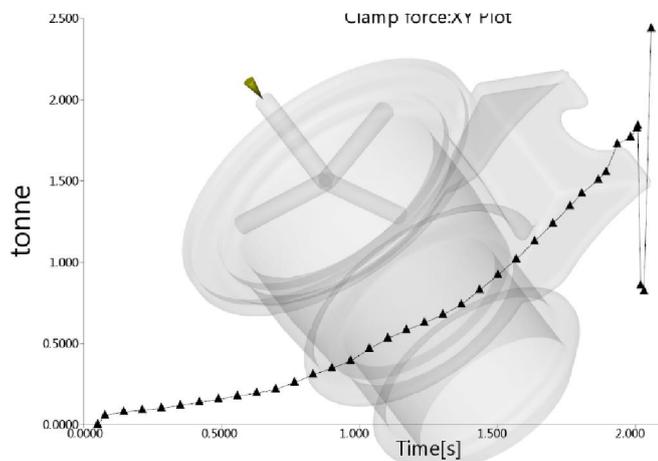
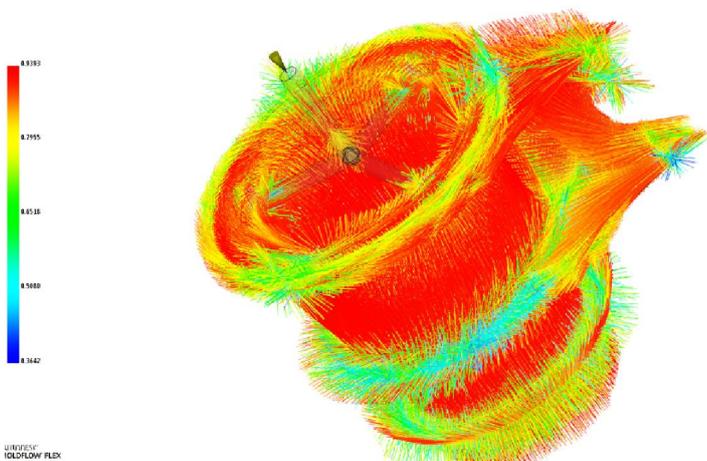


Figura A1.31. 3PP50 Fuerza de cierre

También la fuerza de cierre sufre un aumento, aunque éste sólo se produce en el instante final del llenado alcanzando los 2.5MPa.

### Tensor de fibra



Al igual que con una sola entrada, al aumentar el porcentaje de fibra aumenta también la probabilidad de que esta se encuentre alineada en el material.

Figura A1.32. 3PP50 Orientación de fibra

- 3PA20

Tiempo de llenado

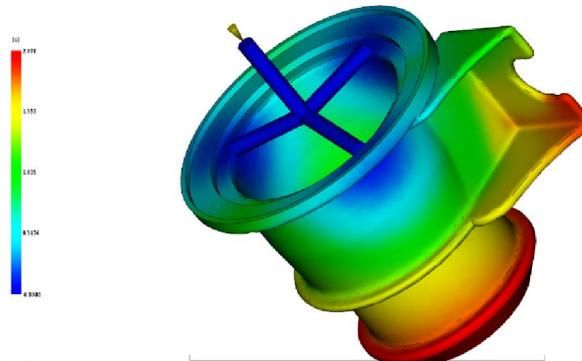
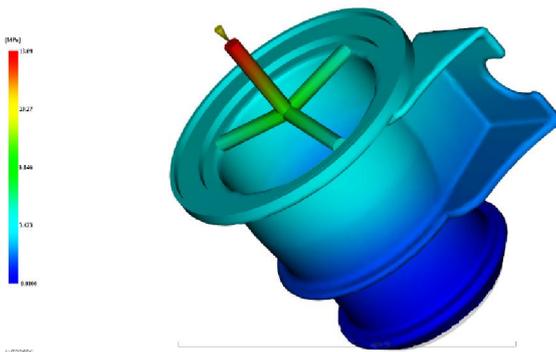


Figura AI.33. 3PA20 Llenado

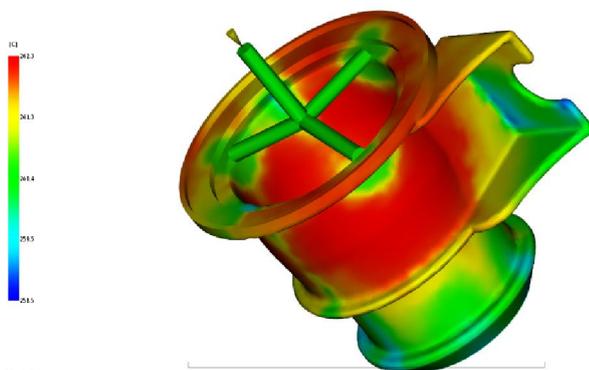
Presión de inyección



Como con la primera configuración, la poliamida es un material más viscoso por lo que tendrá más resistencia al avance de material en el molde y por lo tanto la presión de inyección será mayor. En este caso esta presión alcanza los 13MPa en su valor máximo, que es en el punto de entrada del material.

Figura AI.34. 3PA20 Presión de inyección

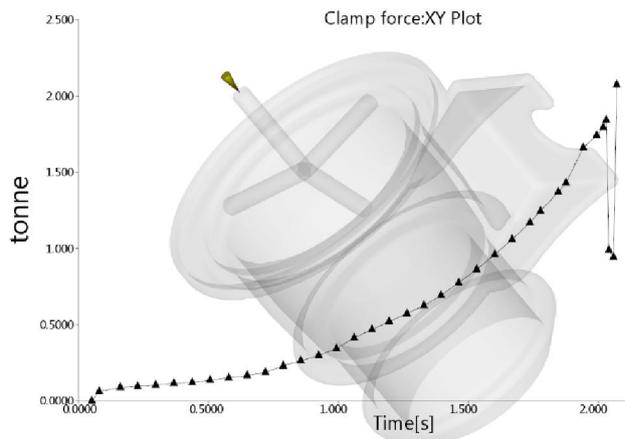
Temperatura en el frente de flujo



Como pasó con la configuración de una única entrada, la variación de la temperatura en el frente de flujo aumenta ligeramente debido a la mayor viscosidad de la poliamida, hasta alcanzar los 4°C.

Figura AI.35. 3PA20 Temperatura en el frente de flujo

### Fuerza de cierre



La fuerza de cierre se ve ligeramente incrementada con respecto al polipropileno (2MPa).

Figura A1.36. 3PA20 Fuerza de cierre

### Tensor de fibra

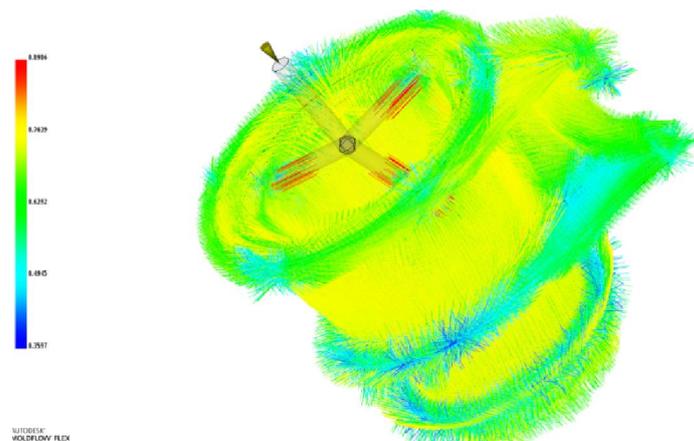


Figura A1.37. 3PA20 Orientación de fibra

Trabajando con la poliamida vemos que es menos probable que la fibra se encuentre alineada, teniendo un valor en torno a 0.6 por toda la pieza.

- 3PA50

Tiempo de llenado

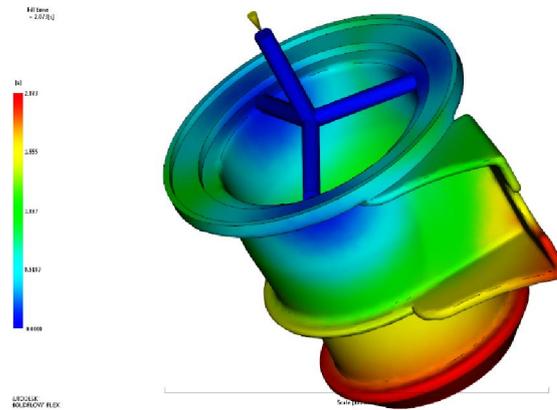


Figura AI.38. 3PA50 Llenado

Presión de inyección

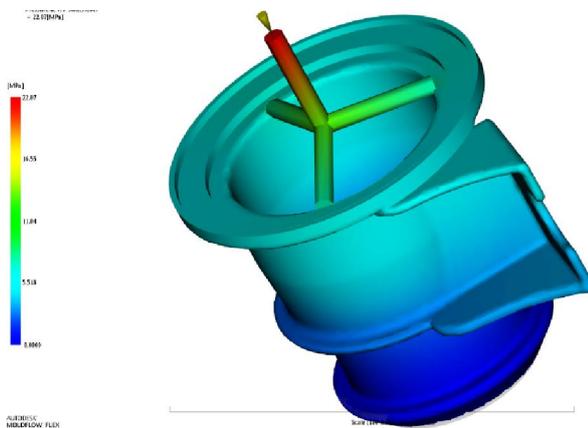


Figura AI.39. 3PA50 Presión de inyección

La presión de inyección con la poliamida, al igual que con el polipropileno, se ve incrementada al aumentar el porcentaje de fibra en el material. Este aumento es más notable en este caso ya que pasa de tener 13MPa con un 20% a los 22MPa con un 50% en fibra.

Temperatura en el frente de flujo

Con la poliamida sí que influye el aumento de fibras en el material ya que la variación de temperatura es de 6°C. Aun así está dentro del rango aconsejable para el proceso de inyección.

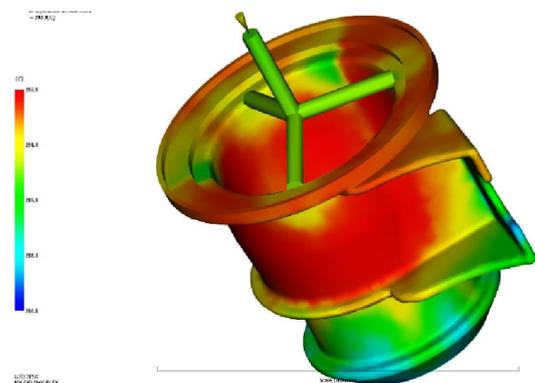


Figura AI.40. 3PA50 Temperatura en el frente de flujo

### Fuerza de cierre

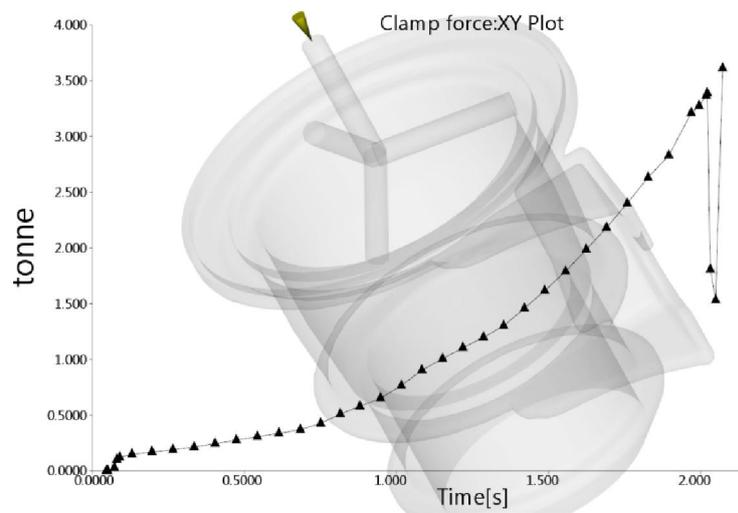


Figura AI.41. 3PA50 Fuerza de cierre

La fuerza de cierre alcanza valores cercanos a los 3.5MPa, lo que se traduce en una fuerza 1.5MPa más alta que con un 20% en fibra.

### Tensor de fibra

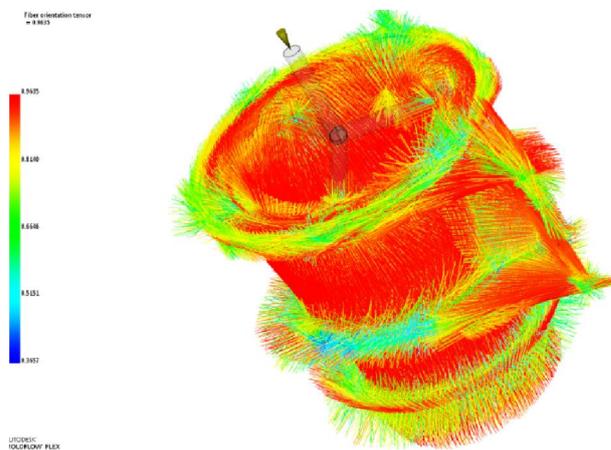


Figura AI.42. 3PA50 Orientación de fibra

A mayor porcentaje de fibra mejor orientada se encuentra ésta. Con la poliamida el cambio entre trabajar con un 20% o con un 50% es más notable que cuando se trabaja con el polipropileno.

## ANEXO II. ABAQUS

ABAQUS es un programa destinado a resolver problemas de ciencias e ingeniería, estando basado en el método de los elementos finitos. El programa puede resolver casi todo tipo de problemas, desde un simple análisis lineal hasta simulaciones complejas no lineales. Además posee una extensa librería de elementos finitos que permite modelar virtualmente cualquier geometría, así como su extensa lista de modelos que simulan el comportamiento de una gran mayoría de materiales, permitiendo su aplicabilidad en distintas áreas de ingeniería.

El programa permite el diseño de todo tipo de geometrías 2D y 3D para su posterior estudio, pero en este trabajo, como ya se ha repetido anteriormente, la geometría de la pieza estará ya diseñada, con lo que todas las características de ABAQUS relacionadas con el dibujo no serán utilizadas. Las características que sí que utilizaremos serán las relativas al análisis estructural del componente, integrando toda la información anteriormente obtenida en MOLDFLOW y DIGIMAT.

Los datos de entrada que se deben introducir son la geometría de la pieza, el material del que está fabricado y sus propiedades, las condiciones de contorno con las que éste trabaja y las cargas que le son aplicadas.

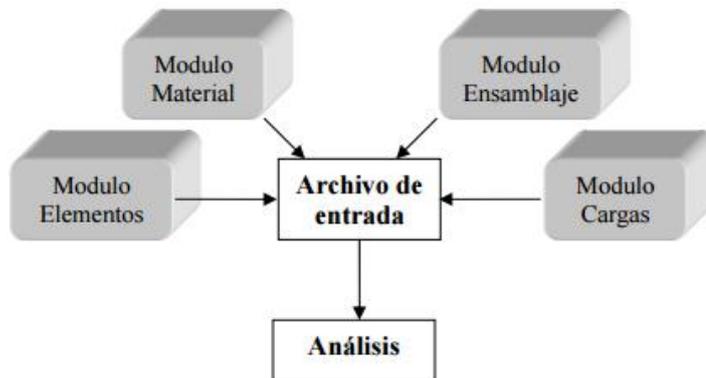


Figura All.1. Componentes de un modelo en ABAQUS

El análisis estructural de ABAQUS nos dará como salida las tensiones y deformaciones que sufre la pieza en cada uno de los ejes de coordenadas.

### **Procedimiento**

Cuando abrimos ABAQUS, nos encontramos con una distribución de elementos en la pantalla donde podemos observar los componentes que se indican a continuación, y que se detallan en la Figura 1.1.

- Barra de título: nos muestra la información referida al archivo en el que estamos trabajando, la versión de ABAQUS y la ventana de trabajo que se encuentra activa.
- Barra de Menú: se encuentran las distintas opciones de trabajo que tendremos disponibles para cada módulo, donde algunas se mantendrán en común (por ejemplo, File, Model, Viewport, View y Edit) y otras variarán módulo a módulo.
- Barra de herramientas: las barras de herramientas brindan acceso rápido a opciones que se encuentran contenidas dentro de los distintos menús.
- Caja de herramientas: encontraremos botones de acceso rápido a las distintas herramientas disponibles para el módulo en el que se está trabajando.
- Barra de contexto: nos permite navegar por los distintos módulos que posee ABAQUS y por las distintas funcionalidades de cada uno. Por ejemplo, en el módulo "Part", nos permite navegar por los distintos modelos y las distintas geometrías o partes.
- Árbol de modelo/resultados: organizan toda la información contenida en nuestro modelo para permitirnos una vista y edición rápida de la misma, como también nos permiten navegar en distintos modelos. En la pestaña "Model" encontramos el diagrama de árbol referido al modelo en sí, pudiendo trabajar con más de uno; mientras que en la pestaña "Results" podemos trabajar con distintos archivos de resultados de análisis.
- Ventana de trabajo: es una ventana que nos muestra una determinada vista de nuestro modelo. ABAQUS permite trabajar con distintas vistas de manera simultánea.
- Área de mensajes y comandos: allí ABAQUS muestra los mensajes de estado, advertencias y errores que se generan al ejecutar una determinada función.

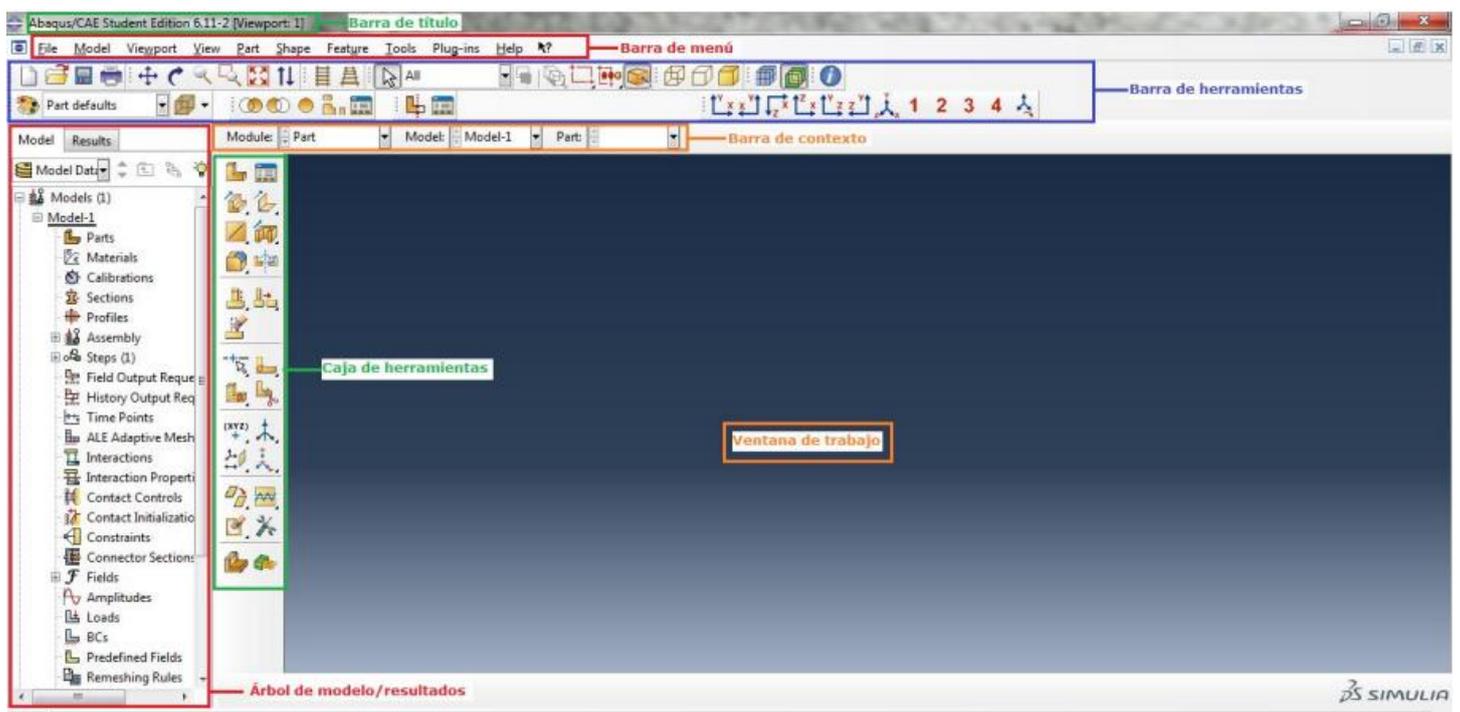


Figura AII.2. Pantalla principal de ABAQUS

Una vez que se han visto todos los elementos de la pantalla del programa es hora de comenzar con nuestro modelo. Para la generación, cálculo y visualización de resultados de un modelo se deben seguir los siguientes pasos en el orden que se enumeran a continuación:

- I. Generación de las partes del modelo
- II. Generación de material.
- III. Definición y asignación de las propiedades de la sección
- IV. Ensamblaje del modelo
- V. Definición de los pasos de cálculo del modelo
- VI. Aplicación de las cargas y las condiciones de contorno
- VII. Mallado
- VIII. Creación y envío del cálculo
- IX. Visualización de resultado

Como se ha comentado en la memoria y en este mismo anexo, la geometría de la pieza ya nos viene definida por archivo. El siguiente paso es el de definir el material de trabajo en el apartado *Materials*, insertando algunas de sus propiedades mecánicas (módulo de Young, coeficiente de Poisson, viscosidad...) o térmicas. Se pueden definir tantos materiales como se quiera, siempre y cuando se asignen correctamente a la zona correspondiente.

Una vez definido el material es necesario crear la sección y asignarla a la geometría. Para crear la sección, ir al menú *Section* y seleccionar la opción *Create*. ABAQUS abrirá una ventana en la que seleccionaremos la opción *Solid-Homogeneous*, y donde se da la opción de identificar con un nombre la sección creada. A continuación se abrirá otra ventana en la que debemos de asignar el material que corresponde a esta sección creada.

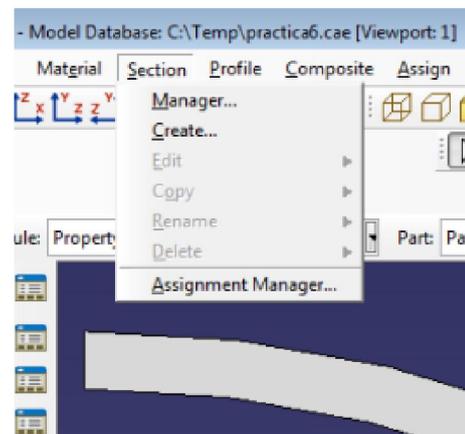


Figura AII.3. Creación de una sección



Figura AII.4. Asignar una sección

Tras crear la sección, debemos asignarla a la geometría creada. Para ello, ir al menú *Assign* y seleccionar la opción *Section*. ABAQUS pedirá seleccionar la geometría correspondiente e inmediatamente abrirá una ventana en la que debemos de seleccionar la sección correspondiente del desplegable. Al asignar la sección veremos como la geometría cambia de color (verde).

Una vez asignada la sección, tenemos que crear el ensamblaje. Para ello seleccionar el módulo *Assembly* del desplegable ubicado en la zona superior izquierda y seleccionar la opción *Create* del menú *Instance*. ABAQUS desplegará una ventana con el *Part* seleccionado y dos opciones para el tipo de *Instance*. Seleccione la opción *Dependent (mesh on part)*. La geometría cambiará nuevamente de color (azul) indicando que el ensamblaje ha sido creado.

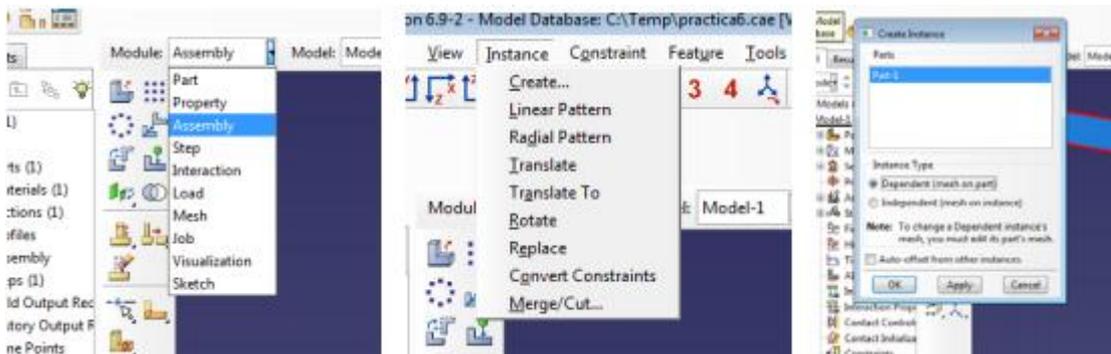
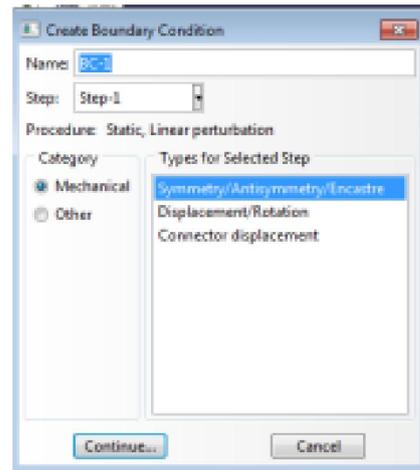
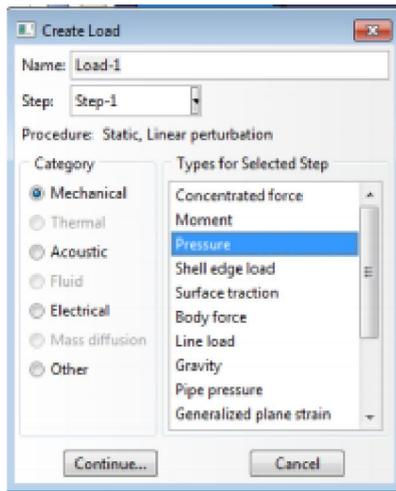


Figura AII.5. Ensamblaje de la pieza

Después procedemos a definir el *Step*. Para ello seleccionamos el módulo *Step* del desplegable localizado en la parte superior izquierda de la pantalla y marcamos en *Create*. En la ventana abierta seleccionamos la opción *Linear Perturbation* del desplegable y verificamos que se encuentre seleccionada la opción *Static-Linear Perturbation*.

Pasamos a definir las cargas y las condiciones de contorno. En el caso de las cargas debemos cambiar al módulo *Load* para seleccionar la opción *Create* del menú *Load*. Se nos abrirá una ventana en donde podremos elegir la categoría y el tipo de carga para después asignarla a la parte de la pieza que deseemos e introducir su valor correspondiente.

Para las condiciones de contorno iremos a *BCs* -> *Create Boundary Condition* y de la lista de pasos de carga seleccionamos *Initial*. Posteriormente iremos a *Category* -> *Mechanical* -> *Types for Selected Step* -> *Symmetry-Antisymmetry-Encastre*, seleccionamos en la ventana principal del programa la zona de la pieza donde se encuentra una de las condiciones y le decimos al programa de qué tipo se trata.



Figuras AII.6 y AII.7. Creación de las cargas (izquierda) y condiciones de contorno (derecha)

A continuación definimos el número de elementos en las diferentes líneas. En el menú *Seed*, seleccionar la opción *Edge by number*. Seguidamente ABAQUS pide seleccionar las regiones a las cuales asignar la semilla, las cuales cambiarán a color rojo, para después introducir el número de elementos deseados en las líneas.

Una vez especificado el número de elementos en cada lado, especificamos el tipo de malla a realizar. Esta malla, tal y como se ha dicho antes, no coincidirá con la creada en MOLDFLOW ya que ABAQUS no puede crear mallas con un número de elementos tan elevado. Para ello, seleccionamos la opción *Controls* del menú *Mesh*. Y en la siguiente ventana *Quad* en *Element Shape*, y *Structured* en la sección *Technique*. Tras oprimir OK verá como la geometría adquiere un color verde intenso.

El siguiente paso será el de elegir el tipo de elemento para el análisis. Para ello seleccionar la opción *Mesh -> Element type* y ABAQUS abrirá una ventana en la con diferentes características a marcar como se puede ver en la imagen. Para mallar la Parte, basta seleccionar la opción *Mesh -> Part*.

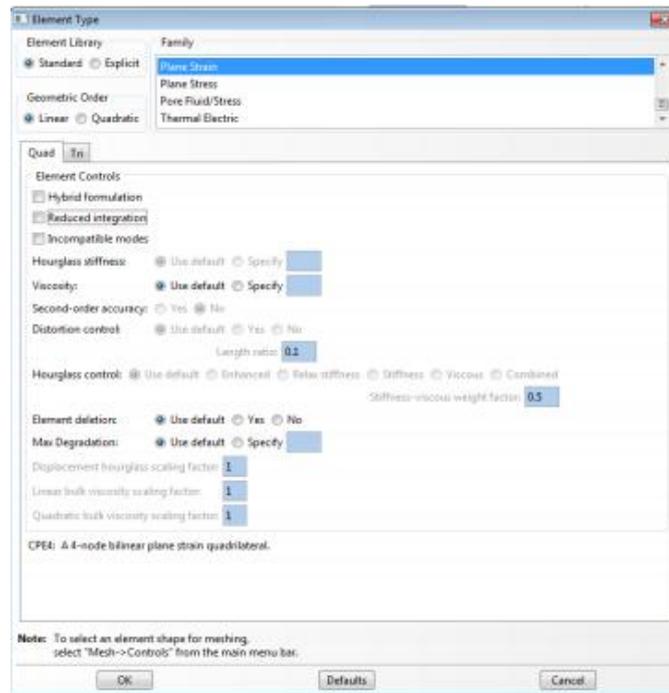


Figura AII.8. Características del mallado

Para resolver el problema se crea un trabajo desde la opción *Job* del desplegable localizado en la parte superior izquierda de la pantalla. Finalmente para ejecutar el trabajo, seleccionar la opción *Job -> Submit* y ABAQUS ejecutará el trabajo seleccionado. Una vez concluida la ejecución del modelo, para visualizar los resultados es necesario cambiar al módulo *Visualization* donde podemos ver resultados de tensiones y desplazamientos.

### Resultados

En esta sección se mostrarán los resultados que ABAQUS no ofrece en cuanto a la tensión de Von Mises (derecha) y los desplazamientos sufridos en la pieza (izquierda). En la Memoria se encuentran los valores numéricos de estos resultados por lo que aquí únicamente aparecerán de modo gráfico. Destacar que, tal y como se ha explicado en la Memoria, la distribución de estos resultados posee la misma forma para cada una de las simulaciones realizadas.

- PP20

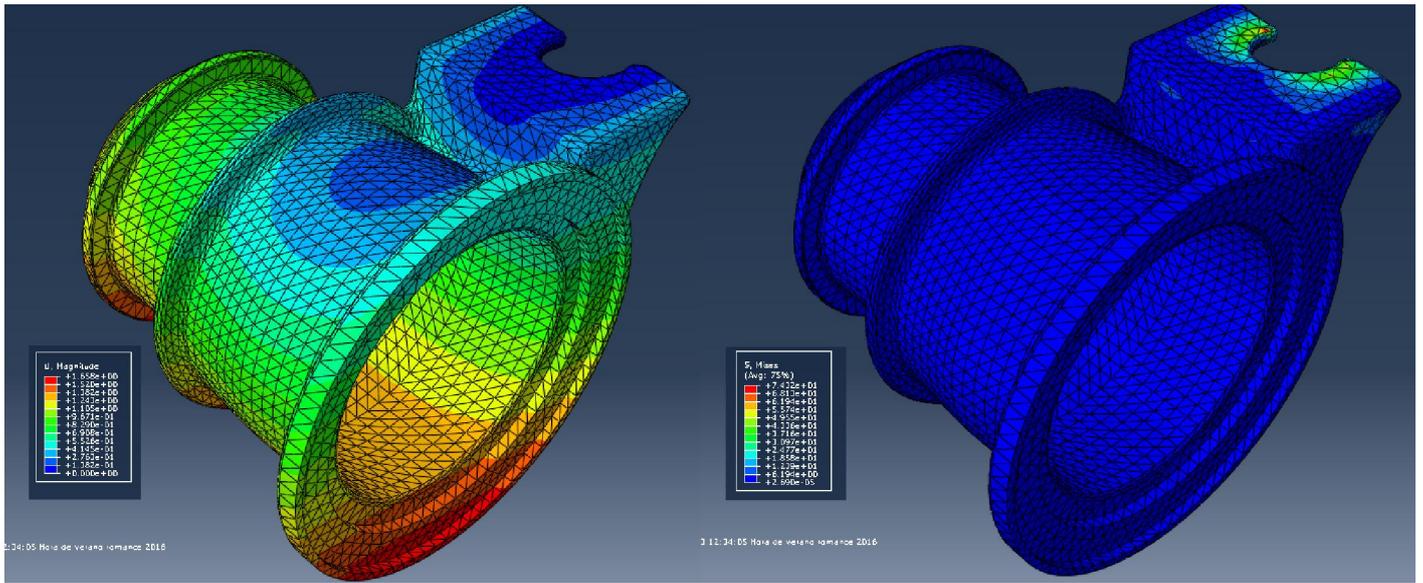


Figura AII.9. PP20

- PP50

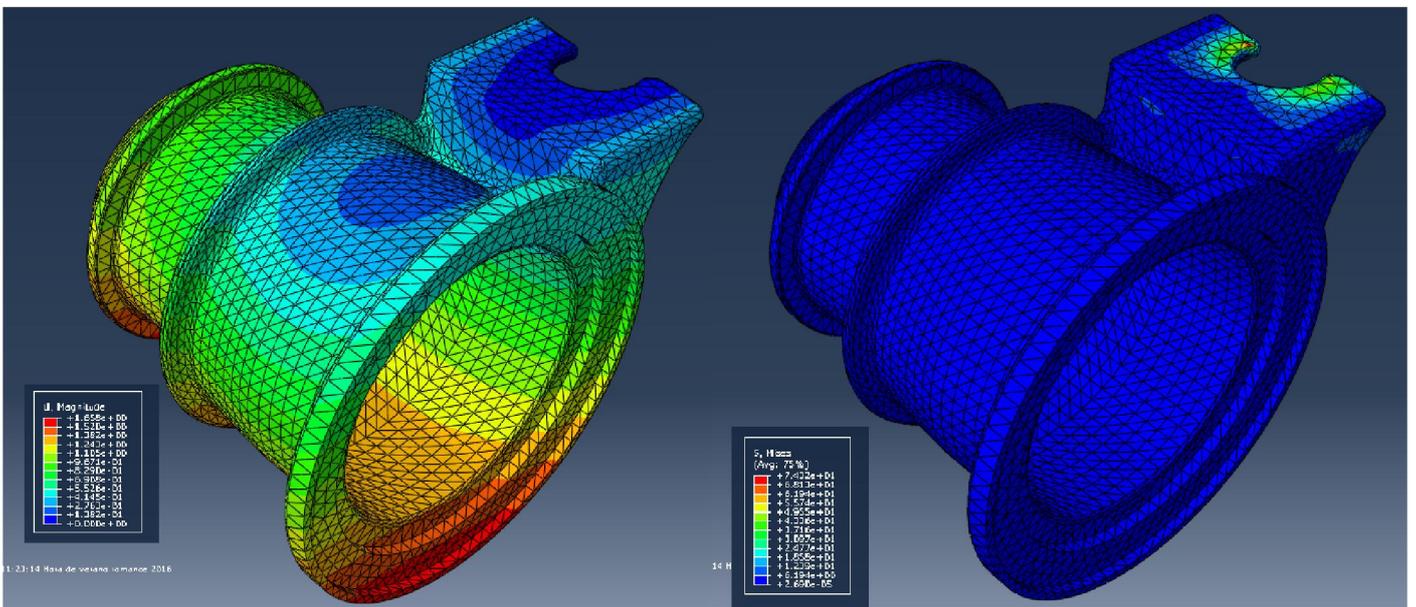


Figura AII.10. PP50

- PA20

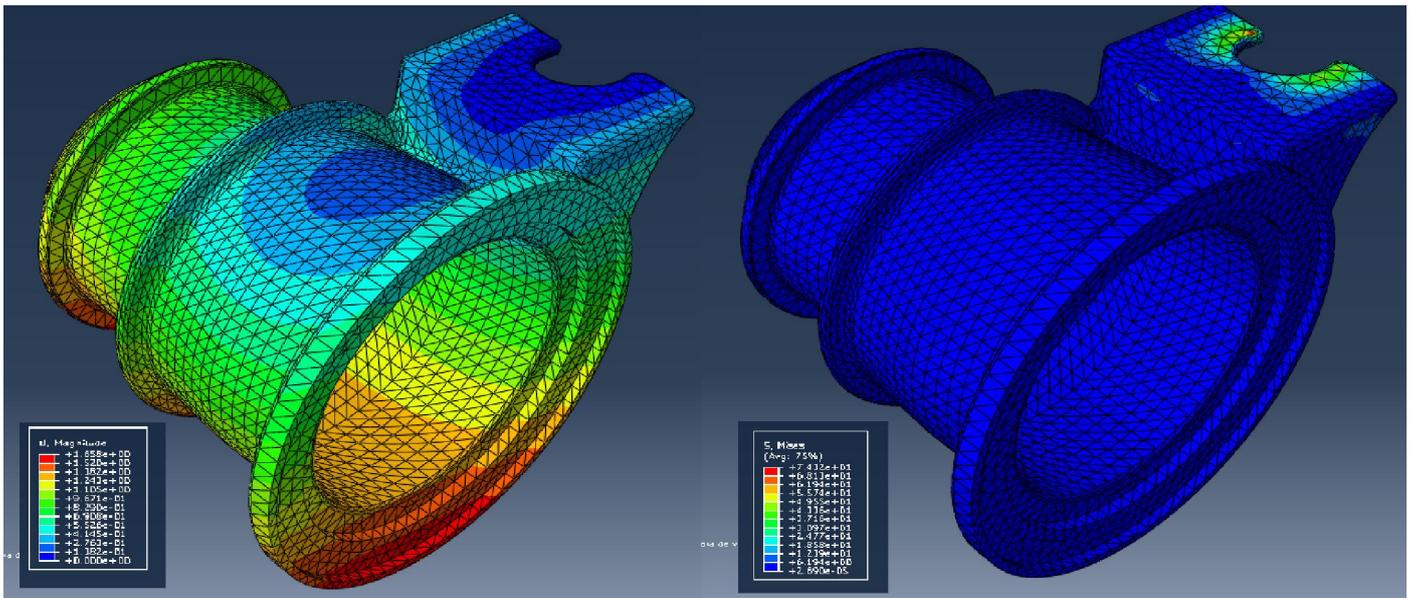


Figura AII.11. PA20

- PA50

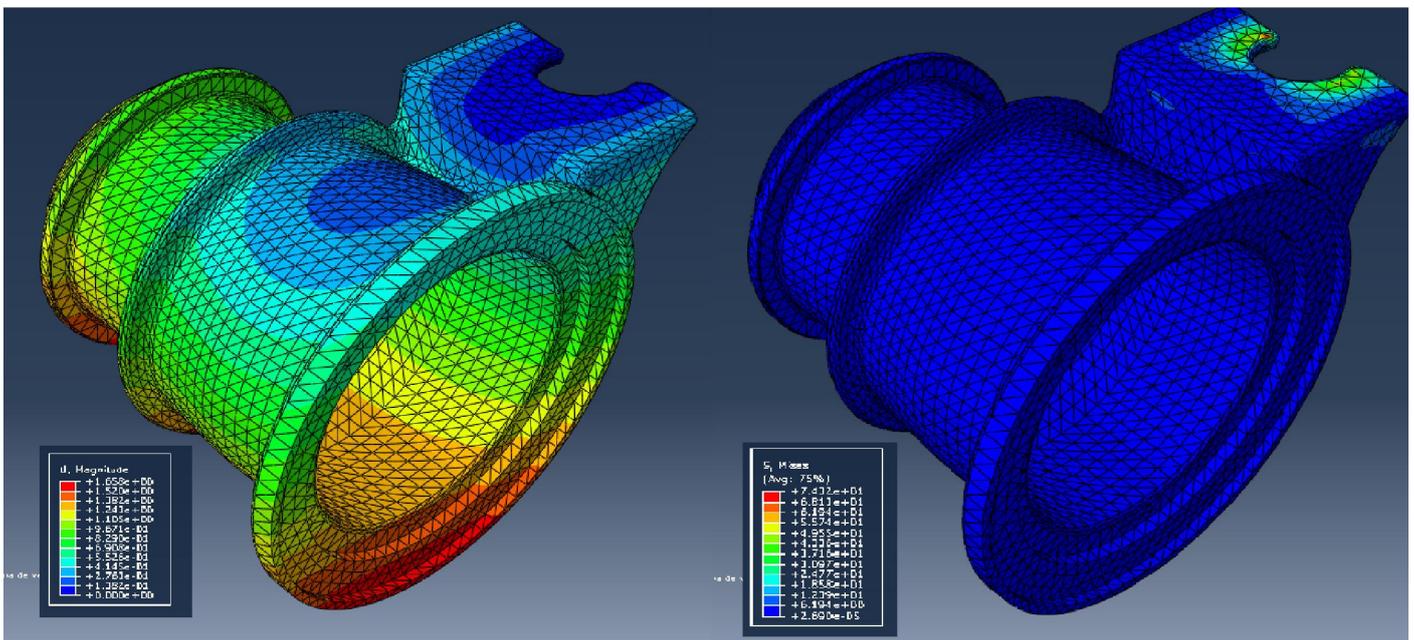


Figura AII.12. PA50

### ANEXO III. DIGIMAT

DIGIMAT es un potente software que hace de unión entre el proceso de fabricación y los datos obtenidos de la simulación estructural. Ofrece una serie de herramientas que sirven para modelar con precisión el comportamiento anisotrópico no lineal de materiales compuestos y para predecir las mejoras estructurales que se dan al utilizar estos materiales. Además, sirve de ayuda para el diseño y la fabricación de nuevos materiales compuestos y piezas con una mayor eficiencia y menor coste.

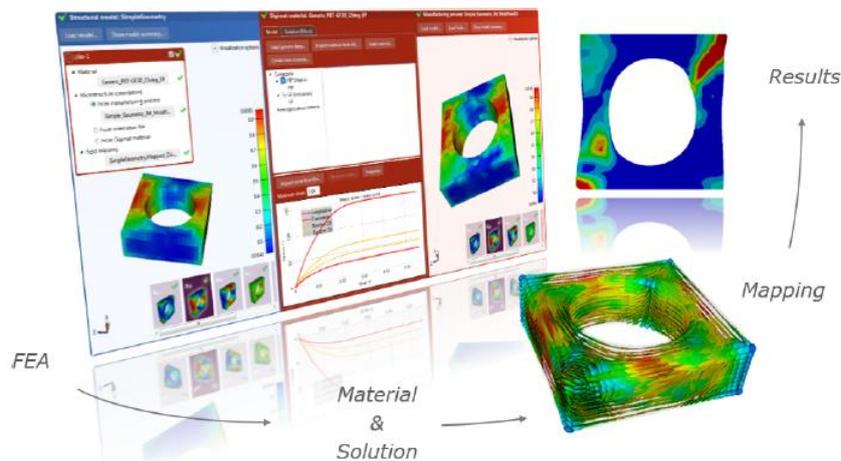


Figura AIII.1. Contenidos de DIGIMAT

Durante este trabajo, y tal y como se ha expuesto en la memoria, utilizaremos este programa para integrar en la malla de ABAQUS toda la información recopilada del proceso de fabricación que ha sido extraída mediante el software MOLDFLOW. Así seremos capaces de apreciar cómo afecta el proceso de inyección a las propiedades mecánicas del componente, comparando estos resultados a los obtenidos sin aplicar la metodología de trabajo.

#### **Procedimiento**

Al abrir DIGIMAT lo primero que nos encontraremos será una pantalla que nos pedirá elegir una de las diferentes modalidades de trabajo de las que se compone, tal y como se ve en la imagen.

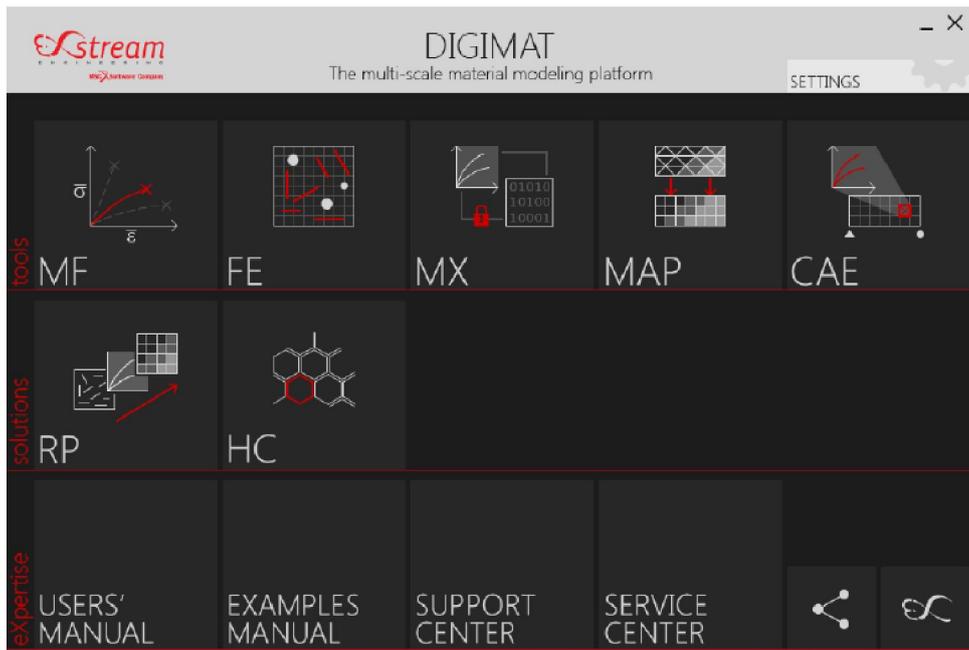


Figura AIII.2. Pantalla de inicio

Para la realización de nuestro trabajo entraremos en el módulo RP. Una vez dentro nos aparecerá ya la pantalla de trabajo, con lo que nuestro siguiente paso será ya el de comenzar con la aplicación de la metodología, que será llevada a cabo mediante una serie de pasos bien señalizados.



Figura AIII.3. Barra de herramientas

Primero le damos a empezar un nuevo trabajo y el programa nos pedirá que introduzcamos la geometría de nuestra pieza con todos los datos necesarios para el análisis mecánico del componente, como son las cargas, condiciones de contorno o el material. Para ello importamos el archivo .inp que hemos extraído de ABAQUS y le indicamos los el sistema de unidades que van a ser utilizados, que deberán coincidir con los que hemos usado en ABAQUS. Seleccionamos *Load Model*, elegimos nuestro archivo .inp que corresponda con el caso que estamos estudiando y después le damos a *Add Digimat Material* → *Load Generic Data*, donde deberemos seleccionar uno de los

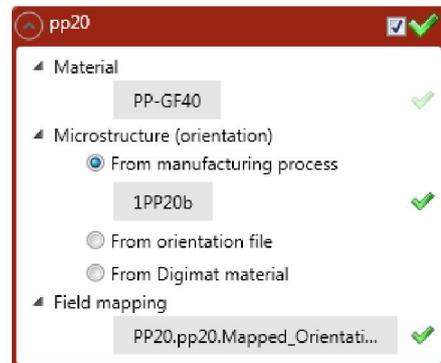


Figura AIII.4. Pasos a seguir para el análisis

materiales de referencia de los que dispone el programa para volcar en el toda la información del material ya particularizado. Hay que señalar que en DIGIMAT las propiedades del material no se obtienen de igual forma que en otros programas, donde se consiguen a partir de datos experimentales. DIGIMAT calcula las propiedades a partir de las propiedades de la matriz y de la fibra por separado, en la proporción adecuada dependiendo del porcentaje de fibra que contenga.

Tras esto será el momento de introducir la información correspondiente a MOLDFLOW. Esta información se encuentra alojada en dos archivos: en un archivo .pat donde está la malla de MOLDFLOW; y otro archivo .xml donde están ubicados todos los datos sobre la orientación de fibra del material. Procedemos a introducir esta información seleccionando *Add Manufacturing Process* para importar el .pat y tras esto *Load Fields* para importar esta vez el .xml.

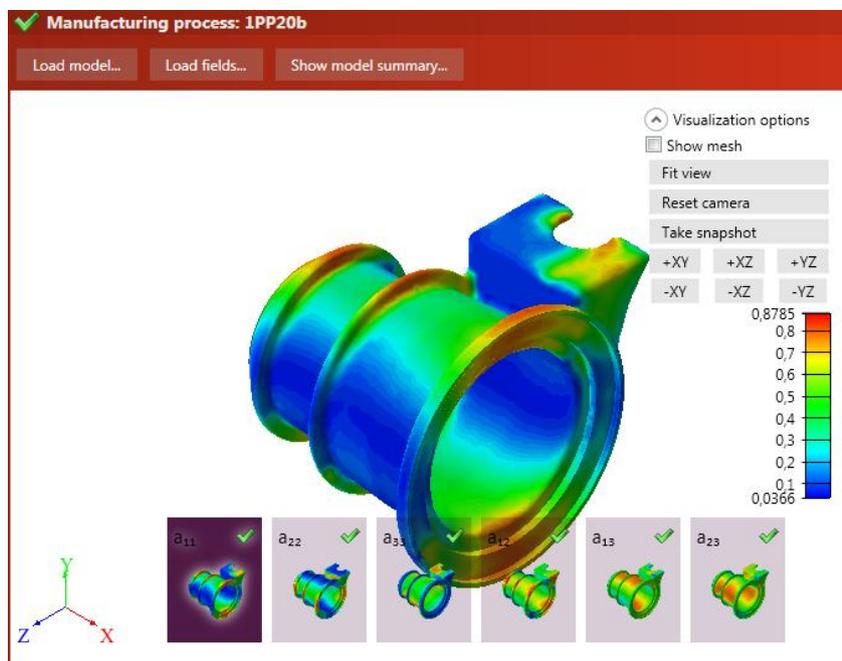


Figura AIII.5. Fibra en las diferentes direcciones

En la imagen podemos ver el proceso a seguir y como va tomando forma el análisis de nuestro componente. El programa muestra la orientación de fibra según las direcciones principales, es decir, según 1, 2 y 3.

El siguiente paso es el de realizar el mapeo a través de *Map Required Fields* → *Map*. Nos aparecerá una pantalla en la que nos pedirá que introduzcamos la tolerancia que el programa usará para el estudio. Introducimos la que nos aparece por defecto y, en caso de que presente algún problema de cálculo y éste no se lleve a cabo, posteriormente seremos capaces de modificarla a nuestro antojo.

Ya solo nos quedará correr el programa para que realice el análisis mecánico. Para ello seleccionamos *Submit* → *Run Locally*. Nos aparecerá una pantalla donde nos da la

posibilidad de modificar los archivos de datos del material y así evitar la aparición de posibles errores de cálculo. Una vez hechos los cambios deseados el programa procederá al estudio del componente, a través de ABAQUS, el cual será el propio DIGIMAT el que se encargará de abrirlo, introducir toda la información y darnos los resultados. DIGIMAT nos devolverá entonces una pantalla en la que indicará si el análisis se ha realizado correctamente y nos abrirá los resultados de éste en ABAQUS.

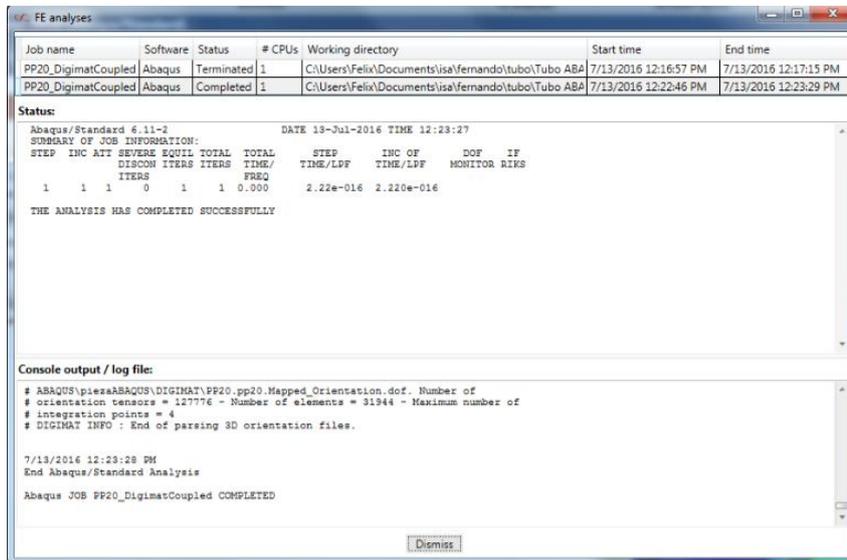


Figura AIII.6. Pantalla de análisis

## Resultados

Una vez visto el procedimiento de trabajo con el programa es hora de mostrar los resultados obtenidos. Si bien es cierto que, al igual que con ABAQUS, las imágenes de los resultados de la distribución de la tensión de Von Mises y de los desplazamientos son iguales para todos los casos, se van a exponer estos resultados igualmente:

- **1PP20**

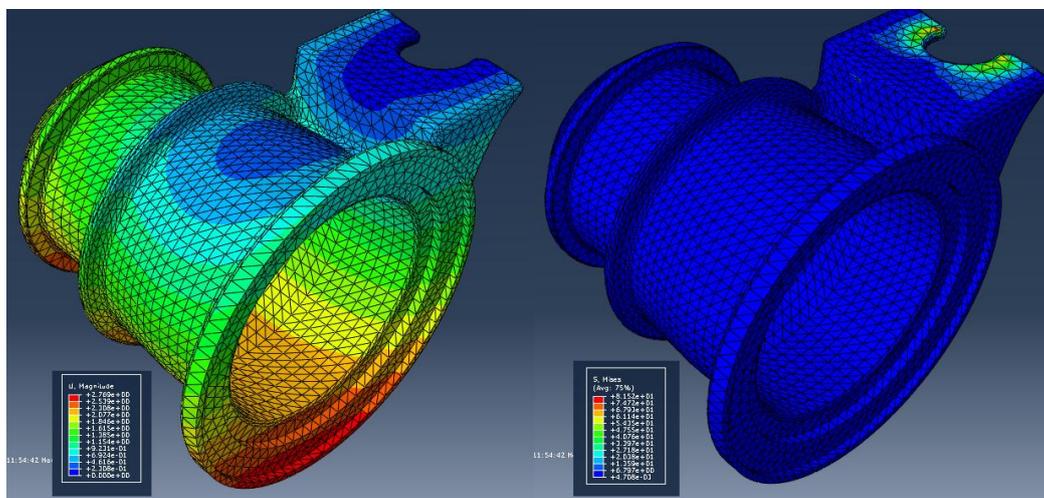


Figura AIII.7. 1PP20

- 1PP50

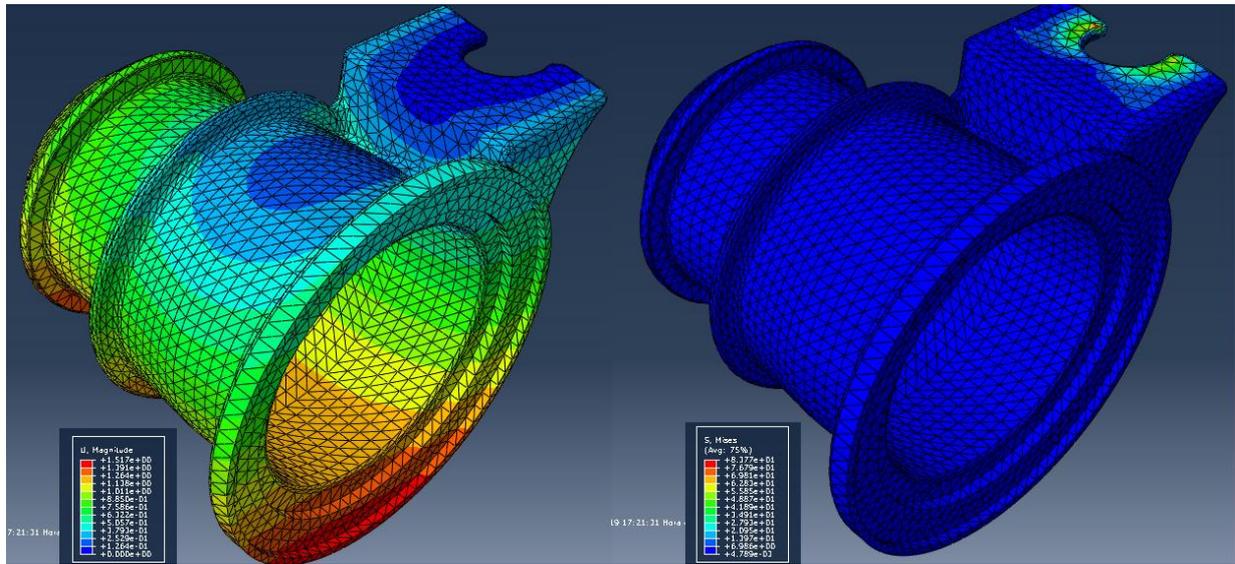


Figura AIII.8. 1PP50

- 1PA20

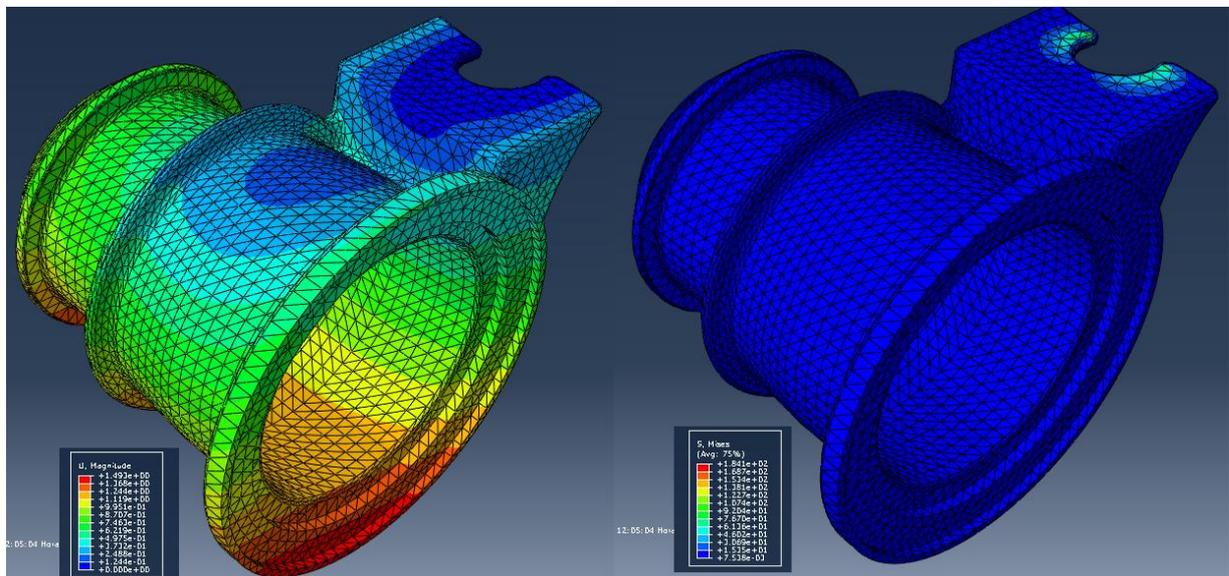


Figura AIII.9. 1PA20

- 1PA50

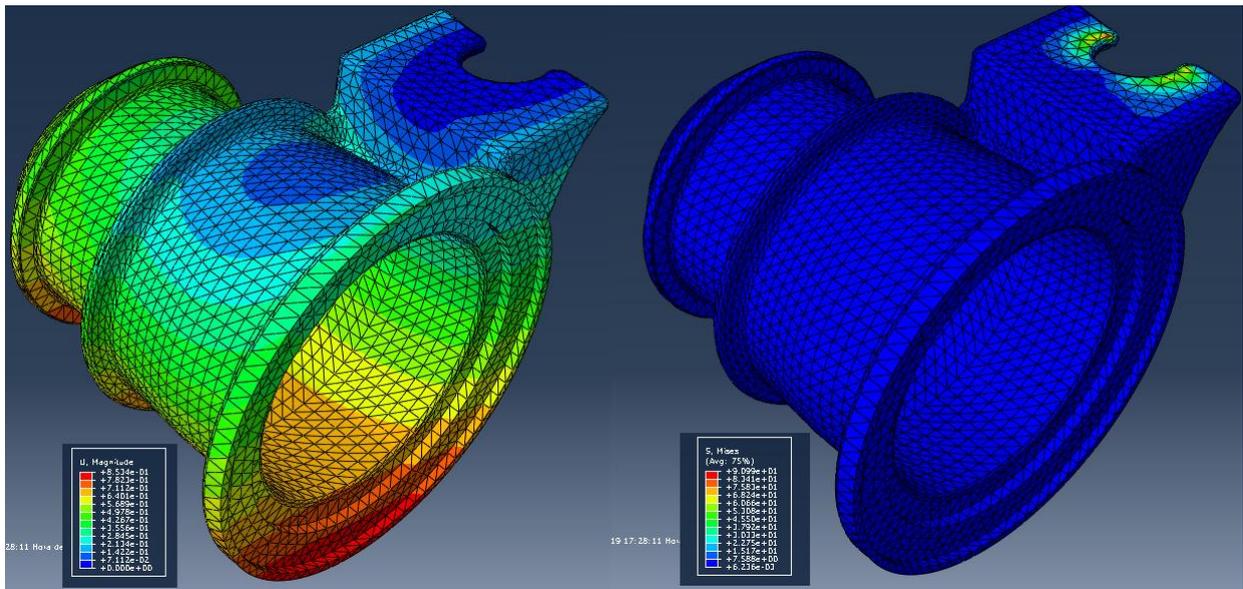


Figura AIII.10. 1PA50

- 3PP20

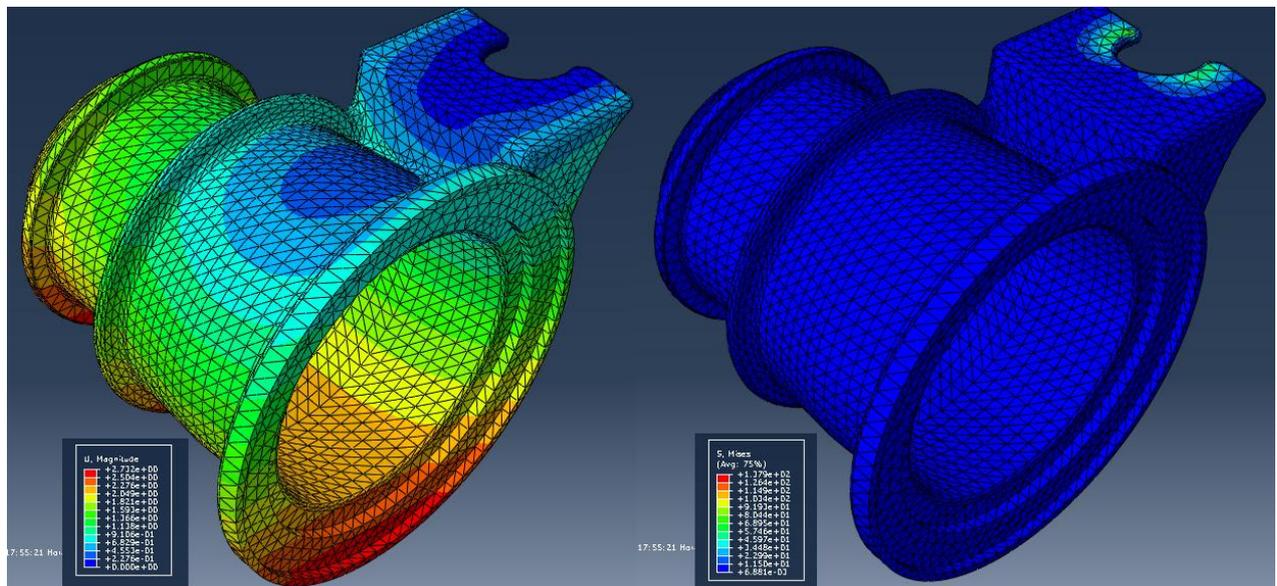


Figura AIII.11. 3PP20

- 3PP50

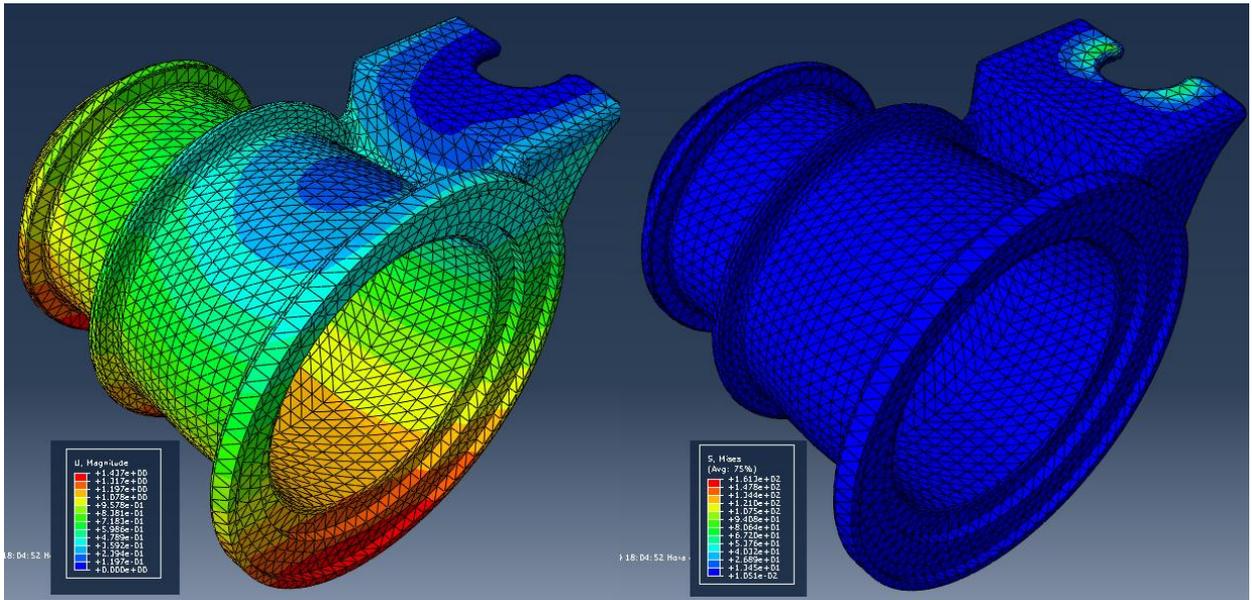


Figura AIII.12. 3PP50

- 3PA20

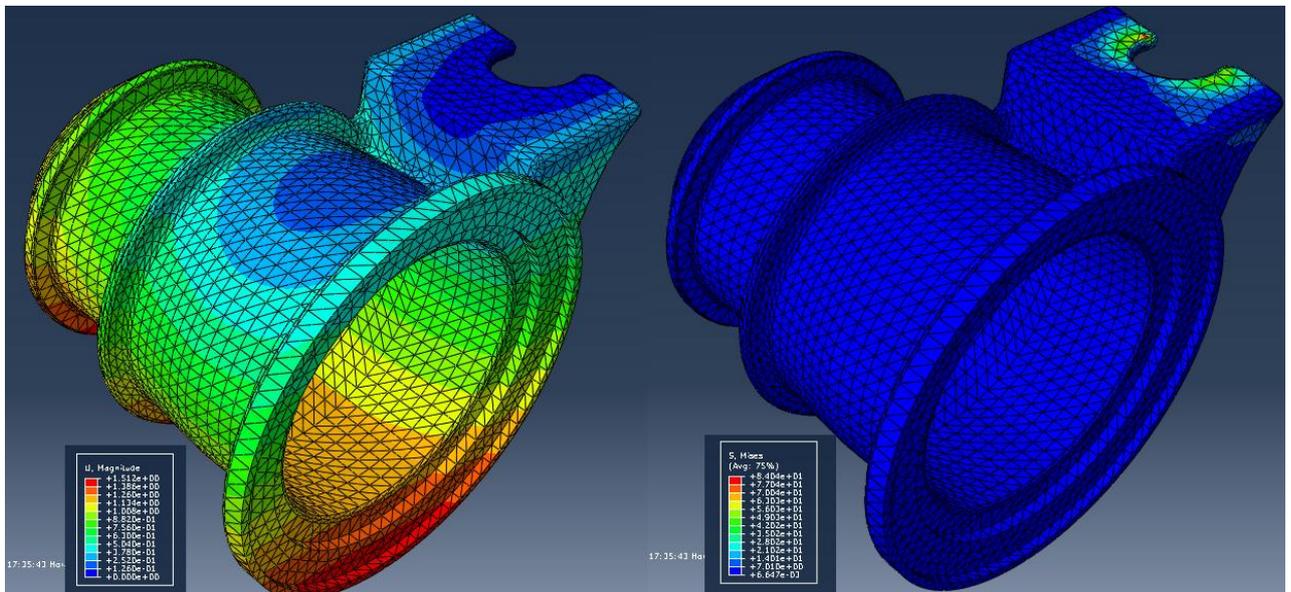


Figura AIII.13. 3PA20

- 3PA50

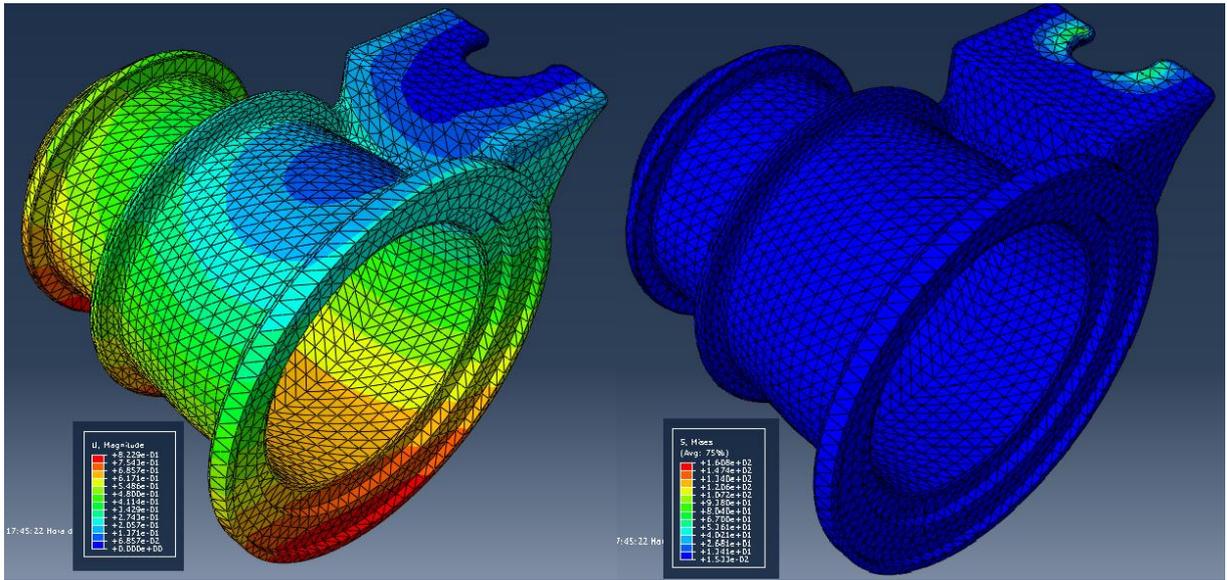


Figura AIII.14. 3PA50

## ANEXO IV. ANALISIS DEL COMPONENTE AL QUE LE HA SIDO APLICADA LA METODOLOGÍA

La pieza que ha sido estudiada durante este trabajo es una parte del turbo del motor de un automóvil. En este apartado se explicará de una forma más específica su funcionamiento y los diferentes tipos que existen.

### Historia

Los motores son máquinas muy ineficientes. Gran parte de la energía que se produce en el interior de los motores procedente de la combustión del combustible se pierde por el tubo de escape en forma de gases calientes. En el año 1905 un ingeniero suizo llamado Alfred Büchi patentó el primer turbocompresor que utilizaba los gases de escape para introducir aire de forma forzada en el motor.

Sin embargo no fue hasta varios años más tarde cuando el turbo se empezó a adoptar de forma habitual en los aviones ya que al aumentar la altitud disminuía la presión y densidad del aire, mermando la potencia de los motores, problema que solventaron utilizando tanto compresores mecánicos como turbocompresores.

No fue hasta los años 60 cuando el turbo vió aplicación en el mundo del automóvil, sin embargo su consolidación se produjo con la llegada del primer coche de producción con motor turbodiesel, el Mercedes 300D. La turboalimentación encontró en los motores diesel una relación de simbiosis. Hasta entonces los motores diesel habían sido mamotretos caros, pesados, ruidosos y poco potentes. El turbo consiguió mejorar algunos de estos aspectos, lo que ayudó a su expansión por toda Europa, hasta el punto de superar por mucho las ventas de los motores de gasolina.

Después de este éxito abrumador del diesel en Europa debido en gran parte a los turbos, llegamos a la primera década del siglo XXI, en la que las normativas medioambientales fuerzan cada vez más a conseguir coches eficientes y limpios. Esto lleva a los fabricantes de coches a mirar otra alternativa para seguir cumpliendo las normativas y vender coches. El downsizing, motores de pequeño tamaño, muy apretados y eficientes que encuentran en el turbo un aliado perfecto, ya sean de gasolina o diesel.

Gracias al turbo pueden dar potencias específicas imposibles de imaginar hasta hace bien pocos años en modelos de entrada a la gama con motores de gasolina, por encima de los 100 CV por litro. Además el uso de turbocompresores aumenta la cantidad de par disponible y lo ofrece en un rango más amplio del régimen, por lo que esta relación entre los motores de gasolina y los turbos también es cómoda de conducir en cruceros a medias vueltas y encima consumiendo poco.

## Qué es y cómo funciona

La potencia que es capaz de generar un motor depende básicamente de la cantidad de oxígeno que es capaz de hacer reaccionar con el combustible, por lo que cuanto más aire es capaz de “bombear” una mecánica, más fuerza tiene. Hay dos formas de conseguir que en un motor entre más aire: aumentando el volumen interno para que quepa la mayor cantidad posible, o comprimir el aire para que sea capaz de entrar en abundancia en una cilindrada pequeña. Esta última alternativa es lo que se conoce como “sobrealimentación” y se consigue comprimiendo el aire antes de meterlo en los cilindros. Para ello se emplean diferentes dispositivos, siendo el más utilizado el turbo.

El funcionamiento básico de un motor turbo es simple: se aprovechan los gases generados por el motor para impulsar más potencia y aumentar las revoluciones a la que trabaja. El turbocompresor consiste en una turbina accionada por los gases de escape del motor de explosión, en cuyo eje se fija un compresor centrífugo que toma el aire a presión atmosférica después de pasar por el filtro de aire y luego lo comprime para introducirlo en los cilindros a mayor presión. Como el aire caliente tiene menos densidad de oxígeno y además provocaría autodetonaciones, antes de mezclarlo con el combustible y meterlo en los cilindros se enfría en un radiador que se llama intercooler. Así, al enviarse aire frío al motor con el turbo, ocupa menos espacio y entra más cantidad.

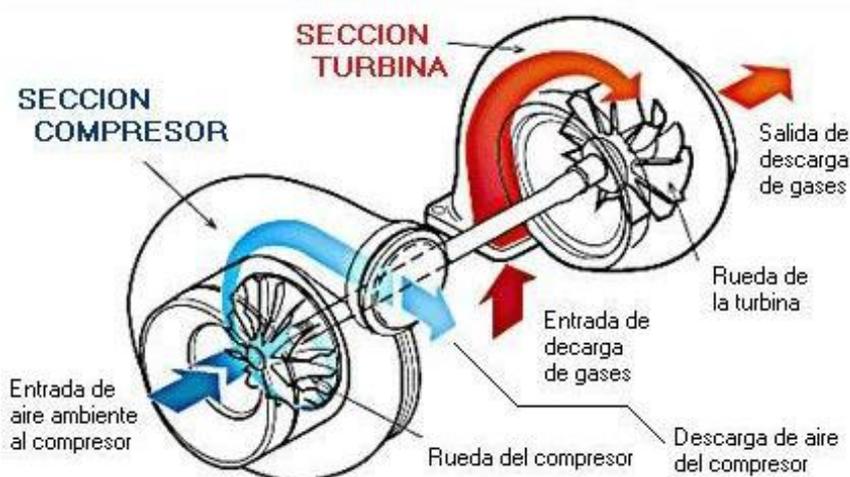


Figura AIV.1. Funcionamiento del turbocompresor

Este aumento de la presión consigue introducir en el cilindro una mayor cantidad de oxígeno que el que aspiraría a presión atmosférica, obteniéndose más par motor en cada carrera útil y por lo tanto más potencia que un motor atmosférico de cilindrada equivalente, y con un incremento de consumo proporcional al aumento de masa de aire en el motor de gasolina. En los diésel la masa de aire no es proporcional al caudal de combustible, siempre entra aire en exceso al ser por inyección el suministro de combustible al cilindro, por ello es en este tipo de motores en donde se ha encontrado su máxima aplicación (motor turbodiésel)

## Constitución de un turbocompresor

Los elementos principales que forman un turbo son el eje común (3) que tiene en sus extremos los rodetes de la turbina (2) y el compresor (1) este conjunto gira sobre los cojinetes de apoyo, los cuales han de trabajar en condiciones extremas y que dependen necesariamente de un circuito de engrase que los lubrica

Por otra parte el turbo sufre una constante aceleración a medida que el motor sube de revoluciones y como no hay límite alguno en el giro de la turbina empujada por los gases de escape, la presión que alcanza el aire en el colector de admisión sometido a la acción del compresor puede ser tal que sea más un inconveniente que una ventaja a la hora de sobrealimentar el motor. Por lo tanto se hace necesario el uso de un elemento que nos limite la presión en el colector de admisión. Este elemento se llama válvula de descarga o válvula waste gate (4).

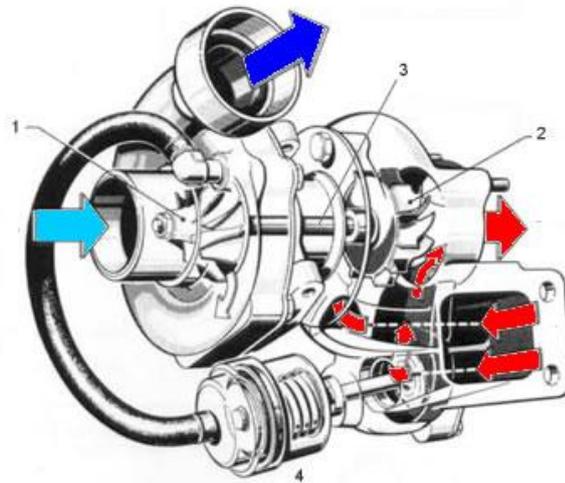


Figura AIV.2. Partes de un turbocompresor

Nosotros trabajaremos con la parte correspondiente a la zona por donde se escapan los gases de salida del motor. Esta zona soporta fuerzas de presión interna, condicionada a la cantidad de aire que sea expulsada. Esta carga posee un valor variable, siendo de 0.1MPa para un régimen nominal de funcionamiento.

## Tipos de turbocompresores

Antiguamente había dos tipos de turbos: aspirados y soplados. La diferencia básica era en qué posición se intercalaban en el circuito del aire de admisión. Los aspirados estaban montados después de que el carburador hubiese realizado la mezcla de aire y combustible, por lo que en realidad comprimían aire y gasolina al mismo tiempo. En los soplados, el turbo comprime el aire antes de que se mezcle con el combustible. Como actualmente todos los motores son de inyección directa, todos los motores sobrealimentados modernos son soplados, ya que el combustible no se añade hasta que el aire ya ha entrado en el cilindro.

Actualmente los turbos se diferencian entre turbos de geometría fija y de geometría variable. En los primeros, el volumen de aire que entra en la turbina del lado del escape es siempre el mismo. Esto tiene un inconveniente, y es que limitamos el rango óptimo de funcionamiento del turbo. Si hacemos un turbo muy grande, necesita mucho gas de escape para moverlo, pero a cambio nos entregará mucha presión de aire en la admisión y mucho caudal. El inconveniente de este turbo sería que en la zona baja de revoluciones

los gases no tienen energía suficiente como para accionarlo y, además, tendría mucha inercia (desde que pisamos el pedal del acelerador hasta que generamos potencia hay un tiempo muy largo, lo que se conoce como turbo-lag o retraso del turbo). Si por el contrario contamos con un turbo pequeño, coge presión rápidamente aunque haya pocos gases en el escape. Su ventaja es que sería capaz de comprimir aire con el motor a pocas revoluciones y con un turbo-lag muy pequeño, pero no podría mantener la presión en el colector de admisión cuando el motor necesitase mucho caudal de aire.

Los turbos de geometría variable (VGT, variable geometry turbocharger) se inventaron para intentar aunar las ventajas de un turbo pequeño y de uno grande. Para ello se ponen unas aletas en el lado de la turbina que no gira (la caracola) que varían su posición y hacen más grande o más pequeña la cavidad en la que se mueven los gases.

Según sea el mecanismo que varía el volumen de la caracola de los turbos de geometría variable tenemos:

- *Turbos VGT neumáticos*: un pulmón accionado por vacío tira de una varilla que orienta las aletas.
- *Turbos VGT eléctricos*: un motor eléctrico acciona el mecanismo que orienta las aletas. Son más rápidos que los neumáticos y más preciso pero son caros y delicados.

Su funcionamiento es muy bueno, pero son caros y menos fiables que los de geometría fija, de modo que poco a poco los fabricantes se decantan por el uso de dos turbos colocados en serie, uno pequeño y uno grande, como veremos más adelante.

Una forma de reducir el turbo lag es hacer más pequeños los turbos. Esto se puede hacer si reducimos la cantidad de aire que tienen que comprimir. Esto es lo que se conocería como un motor biturbo o twin turbo en paralelo (dos o más turbos idénticos se reparten el trabajo para parte de los cilindros del motor).

## **Materiales**

Las altas temperaturas, propias de la tecnología de la sobrealimentación, y la progresiva reducción de tamaño de los compartimientos del motor ponen sobre la mesa de los ingenieros y diseñadores de piezas y sistemas, una serie de nuevos elementos a tener en cuenta al seleccionar materiales. Al mismo tiempo, la tecnología de la sobrealimentación está en continua evolución, se le añaden nuevos subsistemas y se dedican recursos para obtener el máximo rendimiento de todas las prestaciones y beneficios ambientales del sistema en su conjunto.

La fabricación de turbocompresores se reduce a materiales plásticos y materiales metálicos. Es frecuente que en los coches de más años de antigüedad el turbo esté fabricado íntegramente de metal, pero el avance de la industria automovilística y el progresivo requerimiento de vehículos más ligeros y por tanto más eficientes, hacen que cada vez sea más usual el uso de compuestos plásticos. Para suplir a los metales en la

fabricación de estos componentes, los plásticos deben de cumplir los mismos requerimientos mecánicos que estos, y es por ello que son reforzados con fibras de otro material. Estos materiales son los llamados materiales compuestos.

Durante este trabajo, y ya que se trata de un estudio actual, hemos seguido esta tendencia y dos tipos de plásticos compuestos como son la poliamida y el polipropileno han sido comparados, viendo y sacando las conclusiones adecuadas para ver cuál de ambos es mejor para la fabricación del turbo de un motor actual.