

UNIVERSIDAD EAFIT
Escuela de Ingeniería
IP0281 – Procesos de Manufactura

TRANSFORMACIÓN DIGITAL - Experiencia Final

Alejandro Arango

2023-1

Índice

1. Simulación Altair Inspire MOLD	3
1.1. Introducción	3
1.2. Métodos y técnicas	5
1.3. Resultados	8
1.4. Análisis de resultados	13
2. Simulación Altair Inspire CAST	14
2.1. Introducción	14
2.2. Métodos y técnicas	18
2.3. Resultados	20
2.4. Análisis de resultados	22
3. Simulación Altair Inspire FORM	23
3.1. Introducción	23
3.2. Métodos y técnicas	25
3.3. Resultados	27
3.4. Análisis de resultados	28

Índice de figuras

1. Ciclo de inyección	4
2. Partes de una máquina de inyección	4
3. Pieza para simulación de inyección	5
4. Piezas fabricadas en ABS	6
5. Definición del material	6
6. Propiedades del ABS	6

(a). Propiedades térmicas	6
(b). Propiedades reológicas	6
(c). Propiedades mecánicas	6
7. Parámetros para las etapas del proceso de inyección	7
8. Parámetros para la máquina de inyección	8
9. Puntos de inyección	8
10. Filling temperature	9
11. Filling flow front temperature	9
12. Filling pressure	10
13. Filling time	10
14. Filling thickness	11
15. Filling velocity	11
16. Filling density	12
17. Filling air traps	12
18. Fundición	15
(a). Proceso de fundición	15
(b). Piezas fabricadas por fundición	15
19. Etapas de la fundición	16
20. Fundición por gravedad	17
21. Máquinas de fundición por gravedad	17
(a). Carrusel. Volumen de producción alto	17
(b). Célula lineal. Volumen de producción medio	17
(c). Célula flexible. Volumen de producción bajo o medio	17
22. Pieza para simulación de fundición	18
23. Definición del material	18
24. Parámetros para la fundición por gravedad	19
25. Entrada para la fundición de la pieza	20
26. Filling temperature	21
27. Filling pressures	21
28. Filling time	22
29. Filling velocity	22
30. Proceso de embutición	24
31. Máquina de embutición profunda de 150 toneladas	24
32. Pieza para simulación de embutición	25
33. Definición del material	26
34. Restricción para la simulación	27
35. Draw thinning	27
36. Draw formability	28
37. Draw major strain	28

Índice de tablas

1. Simulación Altair Inspire MOLD

1.1. Introducción

Como lo plantea David Ricardo Muñoz, periodista de Tecnología del Plástico [1], el moldeo por inyección es una técnica de fabricación usada para producir piezas de plástico de alta calidad y precisión a gran escala. En grandes rasgos, el moldeo por inyección consiste en la inyección de una cantidad medida de plástico líquido en un molde. Esto se logra mediante la extrusión de una cantidad de plástico líquido a gran presión a través de una boquilla hacia el molde. El plástico es entonces forzado a llenar los espacios del molde por la presión ejercida sobre el líquido. Una vez que el plástico se enfriá y se endurece, el molde se abre para dejar salir el artículo terminado.

El proceso de moldeo por inyección se compone de varias etapas como lo propone David Ricardo Muñoz [1] y la empresa ReyPlas [2]:

1. **Elección del material de molde adecuado:** Por un lado, los moldes de aluminio no son los más adecuados para la producción de grandes volúmenes o piezas con tolerancias dimensionales estrechas, ya que tienen propiedades mecánicas inferiores y pueden ser propensos al desgaste, la deformación y los daños debidos a las fuerzas de inyección y sujeción. Sin embargo, esta es una opción más económica que los moldes más duraderos de acero.
2. **Creación del molde:** Esta es la parte más crítica del proceso de moldeo por inyección. Los moldes, que generalmente están hechos de metal, se mecanizan con precisión para adaptarlos a las características del producto que será fabricado, pues este define la forma de la pieza que se obtendrá.
3. **Preparación del material:** Esto implica seleccionar el material adecuado para la pieza y prepararlo para la inyección. El material suele estar en forma de gránulos, los cuales son cargados en una tolva que introduce el material en la máquina de moldeo por inyección.
4. **Cierre del molde:** La máquina de inyección cierra el molde por medio de una prensa hidráulica o mecánica, con una fuerza de cierre suficiente para contrarrestar la fuerza ejercida por el polímero fundido al ser inyectado en el molde. Si la fuerza de cierre es insuficiente, el molde tenderá a abrirse y el material escapará por la unión del molde.
5. **Inyección:** La unidad de inyección funde el material y lo inyecta en el molde. Esta consta de un tornillo que funde y mezcla el material y una boquilla que inyecta el material fundido en el molde. Durante el enfriamiento el material se contrae dentro del molde.
6. **Envasado:** Inyectado el material en el molde, se envasa a alta presión para garantizar que el material llene completamente el molde. Esta presión se mantiene durante un breve periodo para permitir que el material se enfrié y solidifique.
7. **Enfriamiento:** El material envasado se enfriá para que se solidifique por completo. El proceso de enfriamiento puede acelerarse utilizando líneas de refrigeración por las que circula agua o aceite a través del molde. La temperatura del medio de refrigeración se controla para garantizar que la pieza se enfriá de manera uniforme, evitando que se deforme.

8. **Expulsión:** Una vez que la pieza se ha enfriado y solidificado, se abre el molde y se expulsa mediante pinos eyectores.

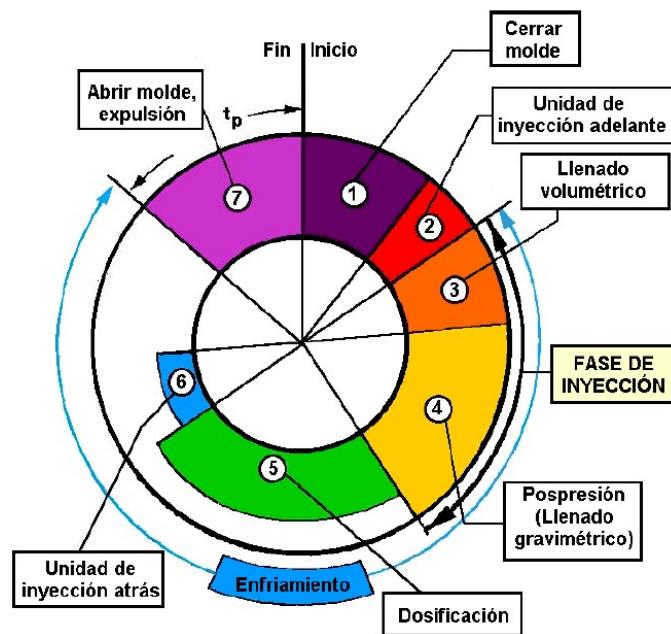


Figura 1: Ciclo de inyección

Para llevar a cabo un proceso de moldeo por inyección se requiere de una maquinaria especializada compuesta por dos partes principales, una unidad de inyección y una unidad de cierre, como se observa en la figura 2. La empresa Gester [3] y el blog Vanto [4] explican ambas secciones con mayor detalle.

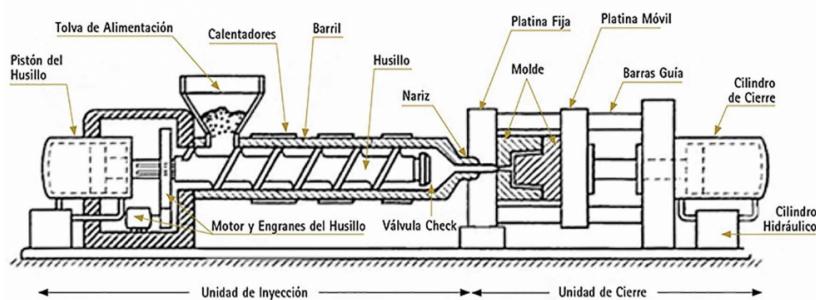


Figura 2: Partes de una máquina de inyección

La unidad de inyección se encarga de fundir, mezclar e inyectar el polímero. Esta unidad consta de tres componentes principales:

- Motor de inyección

- Husillo y camisa
- Calentadores, termopar, émbolo de anillo

Los husillos cuentan con características específicas dependiendo del polímero que se desea fundir. La profundidad del canal del husillo disminuye de forma gradual desde la zona de alimentación hasta la zona de dosificación. De esta manera, la presión en la cámara aumenta gradualmente y el esfuerzo mecánico, de corte y la compresión producido añaden calor al sistema y funden el polímero más eficientemente que si hubiera únicamente calentamiento.

Asimismo, se emplean calentadores y sensores para mantener una temperatura programada constante y tener control sobre el proceso. Un incremento en temperatura o velocidad de inyección disminuye la viscosidad del polímero fundido. Por ello, ambos parámetros deben ser ajustados durante el proceso.

La unidad de cierre, que se presenta como un sistema de prensa hidráulica o mecánica, se encarga de generar una fuerza lo suficientemente grande como para contrarrestar la fuerza ejercida por el polímero fundido al ser inyectado en el molde. Estas fuerzas, que oscilan entre los 200 y los 55000 kN, generan presiones del orden de cientos de MPa de tal manera que el material no escape del molde y produzca piezas con imperfecciones.

1.2. Métodos y técnicas

La simulación de inyección fue realizada para la pieza de la figura 3 en el software Altair Inspire Mold.

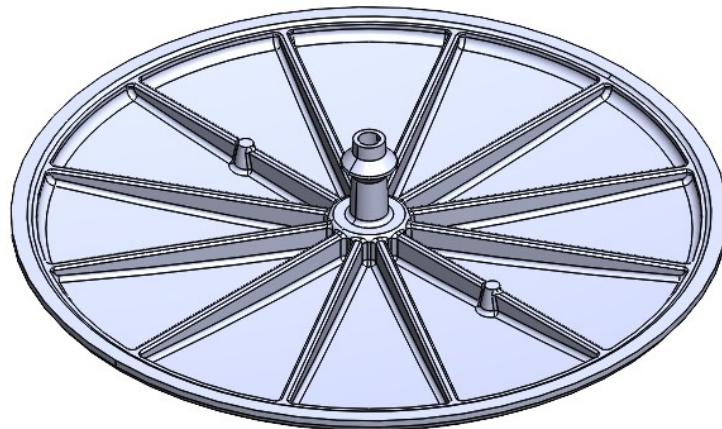


Figura 3: Pieza para simulación de inyección

Como se puede observar, la pieza asignada corresponde a un tipo de tapa, sin embargo, no se logra reconocer su campo de aplicación, y por ende, no se identifican las propiedades específicas que debe presentar la pieza final.

Considerando la apreciación inicial, se establece el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) como el material de la pieza. Como lo expresa la empresa Alser [5], el ABS es un polímero versátil utilizado en diferentes sectores por su gran tenacidad, dureza y rigidez, bajo punto de fusión, y facilidad de moldeado. Asimismo, su contenido en estireno confiere un acabado brillante y atractivo a las piezas moldeadas por inyección, pudiendo teñirse de varios colores y moldearse con diferentes texturas y acabados superficiales.

Estas características le confieren un grado de preferencia en la industria cuando se trata de la fabricación de tapas, cápsulas, cajas, carcasas, canaletas, conectores, y partes de vehículos.

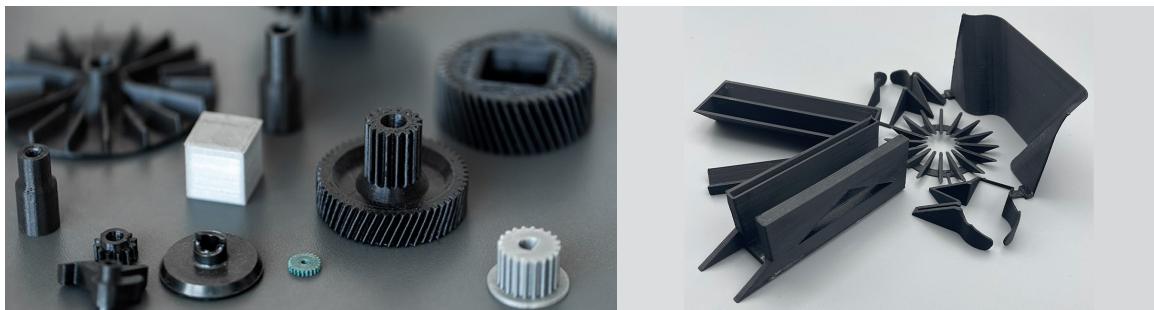


Figura 4: Piezas fabricadas en ABS

En este orden de ideas, para la simulación de inyección, se especifica inicialmente el material de la pieza. El ABS se encuentra en la biblioteca de materiales del software Altair Inspire Mold, por tanto, la temperatura de fusión ya se encuentra especificada dentro del software como se muestra en la figura 5.



Figura 5: Definición del material

Asimismo, las propiedades térmicas, reológicas y mecánicas ya se encuentran establecidas para este material 6.

Materiales		Térmico	Reológico	Mecánicas	PVT	Térmico	Reológico	Mecánicas	PVT
Base de datos de materiales	Mis materiales								
Material de grupo:	ABS								
Nombre del material:	ABS								
Térmico	Reológico	Mecánicas	PVT			Término	Reológico	Mecánicas	PVT
Calor específico:	(2000.0 J/(kg*K))					Módulo de Young:			2.2e9 Pa
Conductividad:	(0.155 W/(m*K))					Coeficiente de Poisson:			0.35
Densidad:	1050.0 kg/m³					Esfuerzo de cedencia:			3.345e7 Pa
						Coeficiente de dilatación térmica:			999999999e-05 1/K
						Reference Shear Stress:			
						8.745e4 Pa			

(a) Propiedades térmicas

(b) Propiedades reológicas

(c) Propiedades mecánicas

Figura 6: Propiedades del ABS

Una vez definido el material y sus propiedades, se verificaron los parámetros de las etapas y de la máquina. Las etapas del proceso de inyección dentro del software están divididas en 3: Filling, Packing, y Cooling. Para este caso, únicamente se estudió la etapa de llenado (Filling), donde se verificó inicialmente el tiempo de llenado, el porcentaje de volumen llenado, y la presión de mantenimiento y empaquetado.

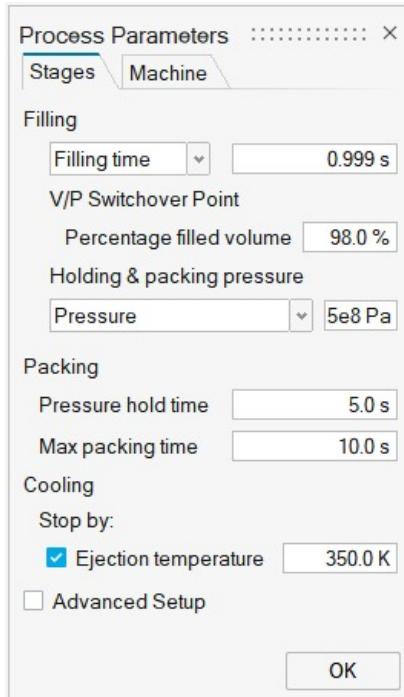


Figura 7: Parámetros para las etapas del proceso de inyección

El tiempo de llenado (Filling time) es el tiempo en el que tarda el husillo en llenar el volumen del molde con el material fundido. Este proceso se realiza en un tiempo muy reducido para prevenir el enfriamiento del material antes de que el volumen haya sido llenado. En este caso, el proceso de llenado tarda 0.999 segundos para llenar el 98 % del volumen del molde. Este porcentaje de volumen llenado (Percentage filled volume) es el porcentaje de volumen del molde que se llena volumétricamente, el otro 2 % se completa con el llenado gavimétrico por medio del envasado, el cual es ejecutado con una presión de mantenimiento y empaquetado (Holding & packing pressure) de 500 MPa.

Los parámetros de la máquina, como su nombre lo indica, establecen las características de la máquina, más específicamente, de la unidad de cierre. Para establecer la presión de inyección máxima (Max injection pressure) y la fuerza de sujeción máxima (Max clamp force) se consultó con el analista de inyección Juan Alejandro García. Con base en las indicaciones del analista, se definió una presión de inyección máxima de 150 MPa y una fuerza de sujeción máxima de 3.5e6 N o 350 toneladas, como se observa en la figura 8.

La presión de inyección máxima, como lo indica el manual de Altair Inspire Mold [6], es la presión máxima de material que la máquina puede producir con el tornillo actual. Esta presión se puede calcular a partir de la presión hidráulica máxima multiplicada por la relación de intensificación del tornillo. Por otra parte, la fuerza de sujeción máxima fuerza máxima requerida para mantener el

molde cerrado durante el proceso de inyección. Esta es la fuerza de sujeción máxima para la máquina en Newtons.

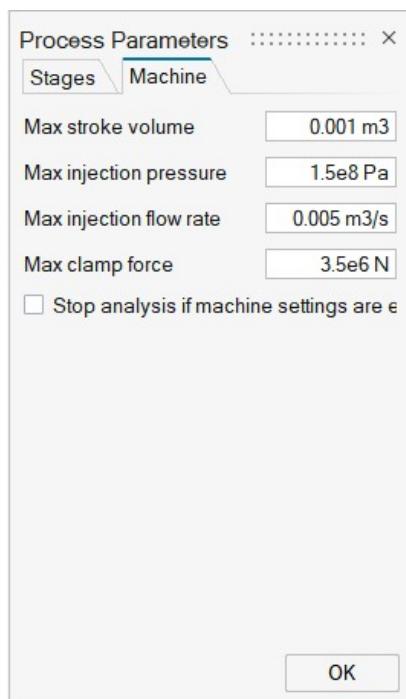


Figura 8: Parámetros para la máquina de inyección

Por último, se definieron dos puntos de inyección en los puntos establecidos para esto en la modelación de la pieza 9. Por el tamaño de la pieza se escogieron dos puntos en vez de uno. De esta manera, se produce un llenado más rápido y se previene una temperatura de llenado desigual que podría producir imperfecciones en la pieza final.

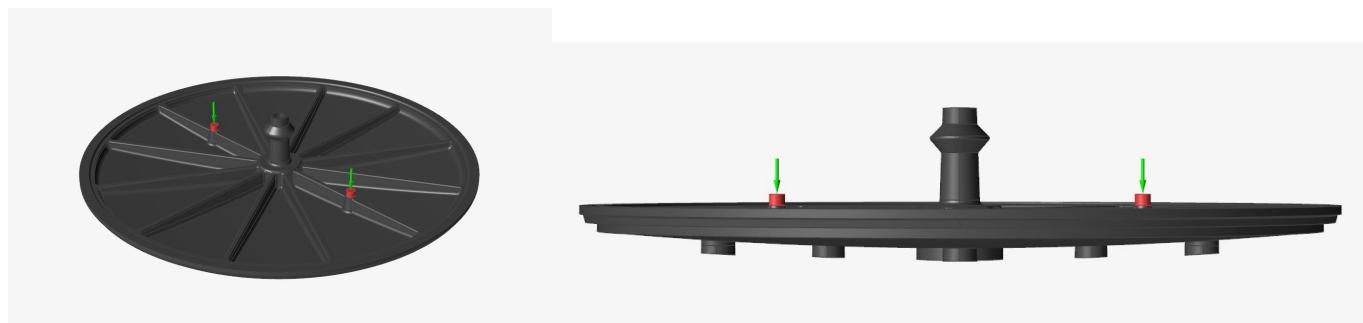


Figura 9: Puntos de inyección

1.3. Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos con la simulación de inyección para las variables de temperature, flow front temperature, pressure, filling time, thickness, velocity, density y air traps.

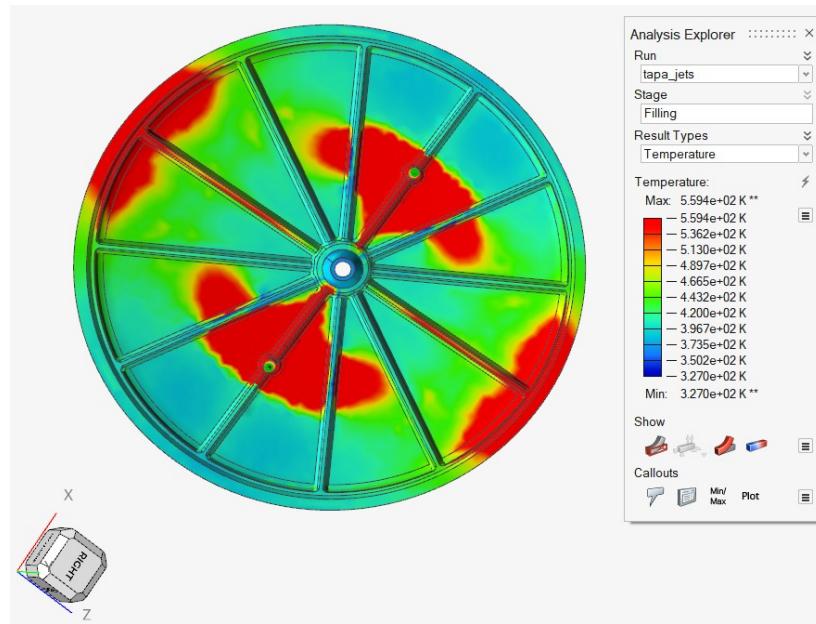


Figura 10: Filling temperature

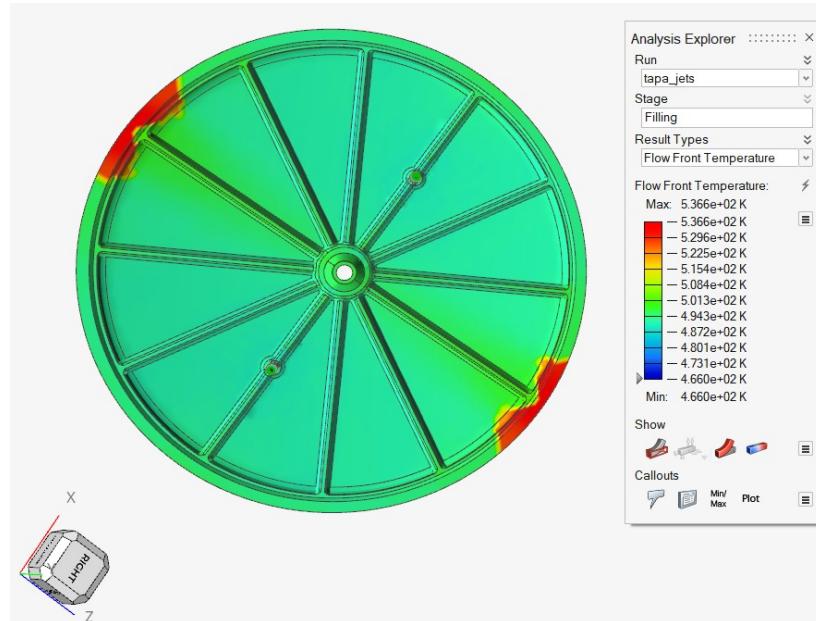


Figura 11: Filling flow front temperature

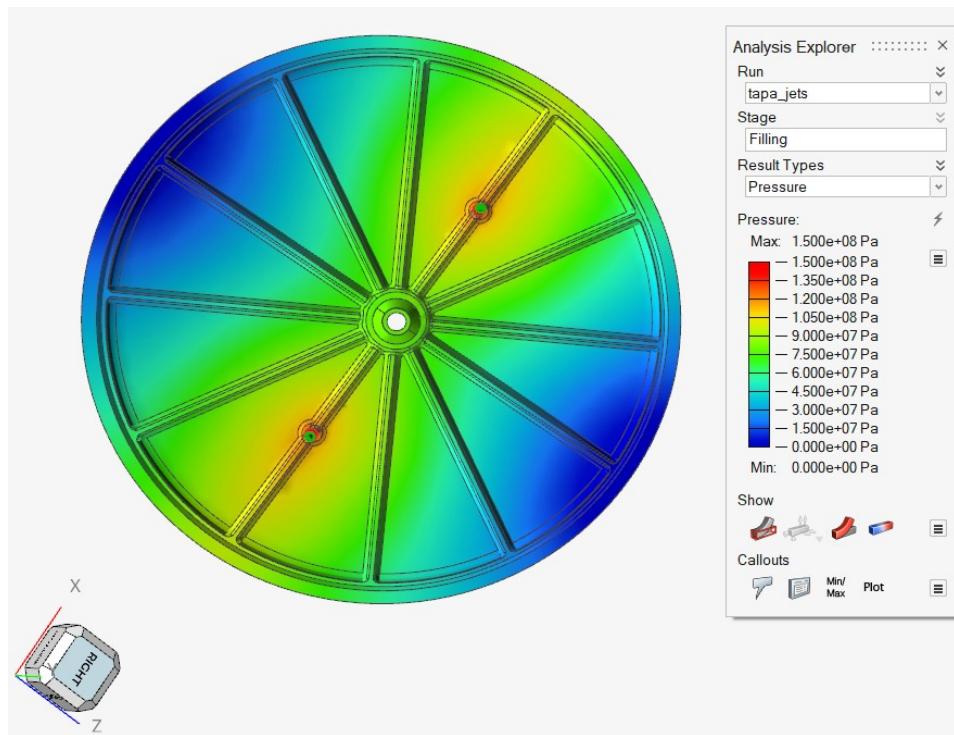


Figura 12: Filling pressure

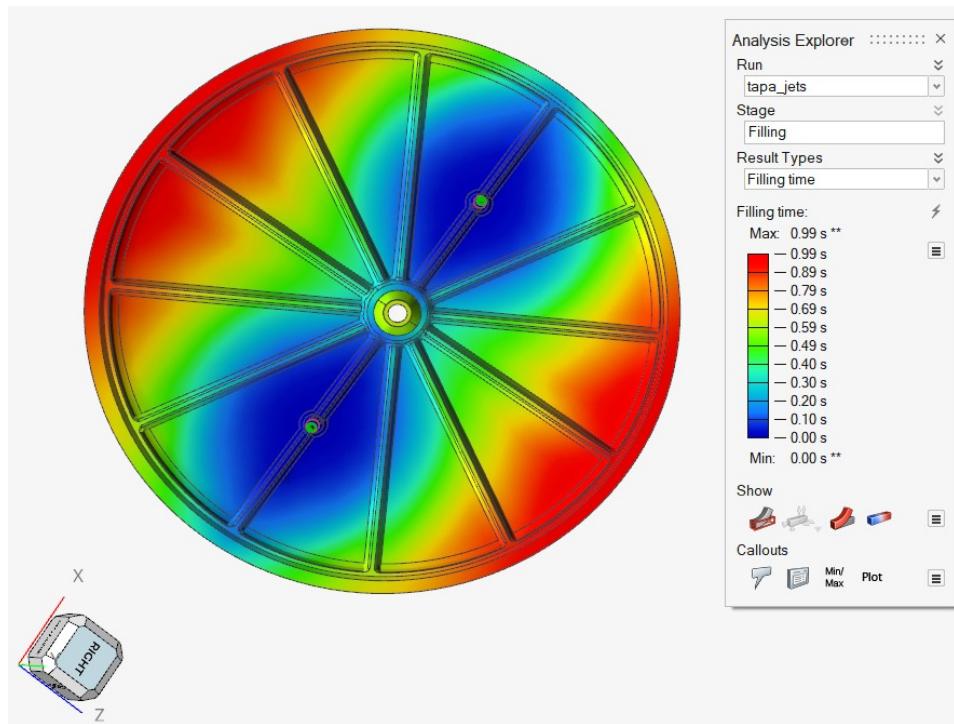


Figura 13: Filling time

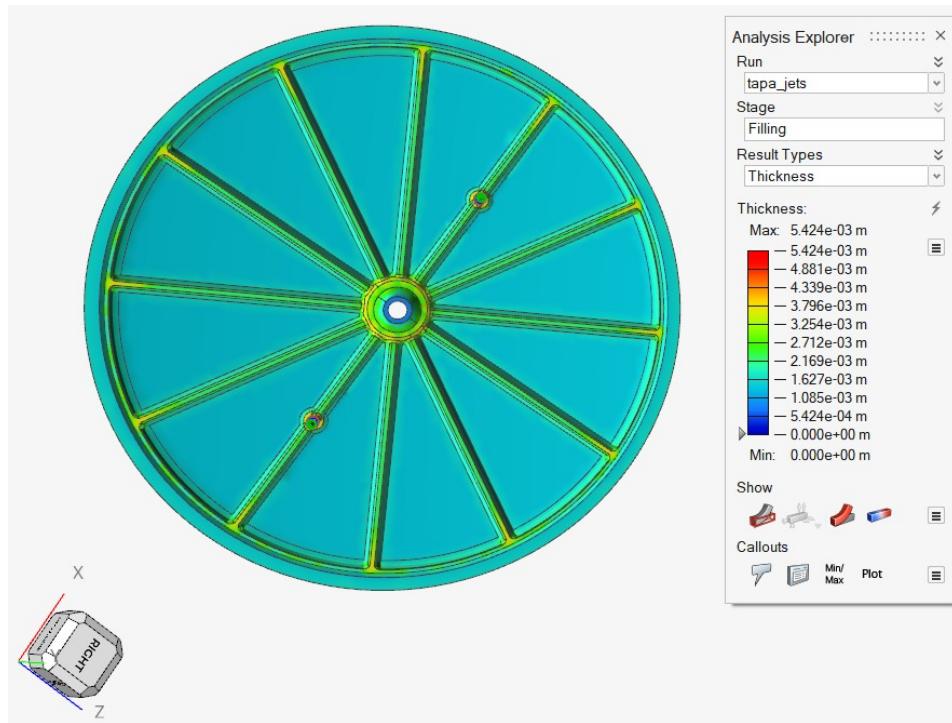


Figura 14: Filling thickness

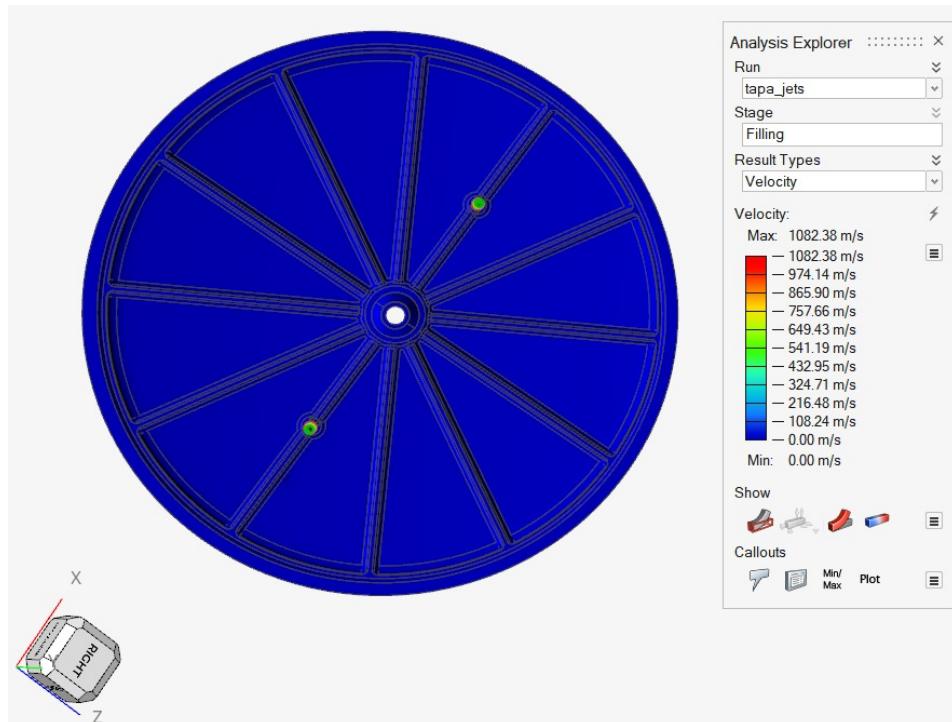


Figura 15: Filling velocity

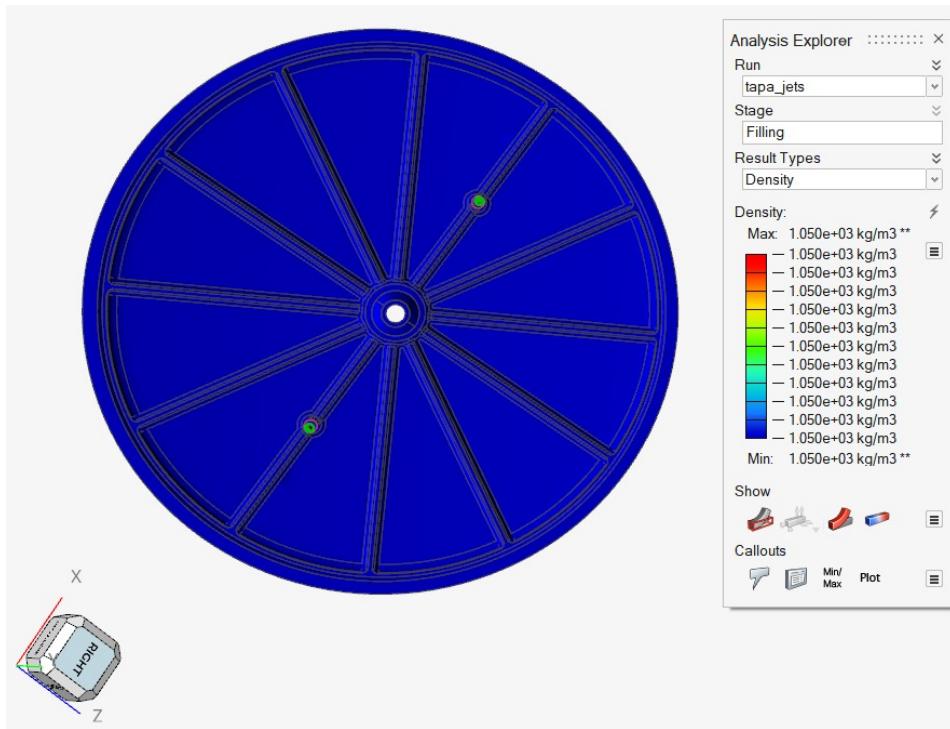


Figura 16: Filling density

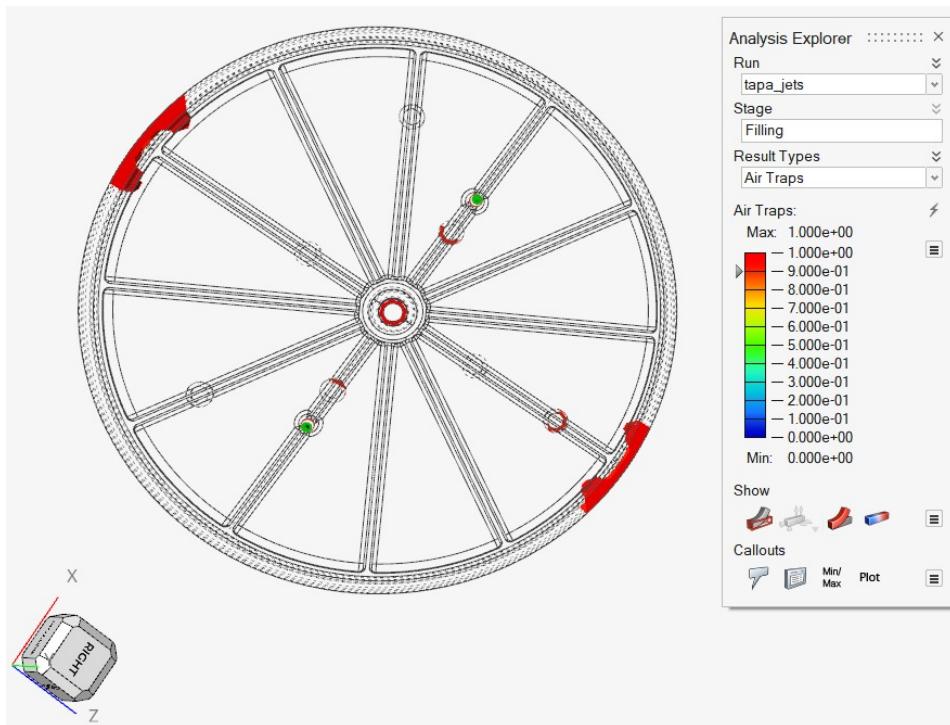


Figura 17: Filling air traps

1.4. Análisis de resultados

De la gráfica de temperatura de llenado 10 se puede apreciar que la temperatura del ABS fundido oscila entre un máximo de 559 K y un mínimo de 327 K. Considerando que la temperatura de fundición del ABS es de 489.891 K, se presentan zonas de excesivo enfriamiento que pueden resultar en imperfecciones en la pieza. Para solucionar esto, se debe incrementar la velocidad de llenado para obtener una temperatura más uniforme sin incurrir en un exceso de velocidad que pueda producir líneas de soldadura que produzcan problemas estructurales y cosméticos.

De la gráfica de temperatura del frente de flujo 11 se identifica que en los extremos más alejados a los puntos de inyección, la temperatura de frente de flujo de 536.6 K es máxima. Por tanto, estas zonas de la pieza pueden presentar imperfecciones debido a la temperatura excesiva.

De la gráfica de presión de llenado 12 se puede apreciar que la presión máxima se presenta en los puntos de inyección, con 150 MPa de presión, el cual corresponde al valor especificado en los parámetros de máquina. En las zonas más alejadas de los puntos de inyección, la presión se reduce a entre 15 MPa y 0 MPa.

De la gráfica de tiempo de llenado 13 se identifica un tiempo de llenado máximo de 0.99 segundos como fue especificado en los parámetros de la etapa de llenado. Las zonas que se llenan en menor tiempo son las aledañas a los puntos de inyección, mientras que las zonas más alejadas son las que tardan más en llenarse.

De la gráfica de espesor de relleno 14 se puede determinar que existe un espesor uniforme a lo largo de la pieza, a excepción de la zona central y el final de los canales que salen de esta. En la generalidad de la pieza, el espesor uniforme es un buen indicativo, pues con base en el manual de Altair Inspire Mold, el espesor de la parte local afecta las velocidades de deformación locales y el flujo de calor. En las zonas críticas previamente mencionadas se produce un cambio de espesor de entre 2.169e-3 metros y 3.254e-3 metros. Estos cambios bruscos de espesor provocan un enfriamiento desigual, lo que puede provocar la contracción de la pieza y defectos como marcas de hundimiento en la pieza final. Para prevenir esto, se deben modificar los valores de la velocidad, temperatura y presión de llenado.

Con base en las gráficas 15 y 16, la velocidad y densidad de llenado son uniformes a lo largo de toda la pieza. Se requiere que estos valores sean uniformes a lo largo del proceso para generar resultados de alta calidad, sin imperfecciones como las líneas de soldadura.

Finalmente, la gráfica 17 indica que las zonas más alejadas de los puntos de inyección presentan aire atrapado debido a los patrones de flujo. Para prevenir esto, se debe implementar un sistema de ventilación que permita la salida de este aire concentrado.

2. Simulación Altair Inspire CAST

2.1. Introducción

Como lo plantea Dassault Systemes en su guía para fundición [7], la fundición es un proceso de moldeo que consiste en llenar un material líquido en un molde con la forma deseada. El líquido se enfriá gradualmente y se solidifica. La pieza solidificada se llama fundición. Se expulsa o se rompe el molde para finalizar el proceso y la pieza puede ser acabada por procesos de rectificado, pulido y esmaltado.

Los dos tipos principales de fundición son los metálicos y los no metálicos (como el yeso, el hormigón o la resina). La fundición de metales consiste en calentar un metal hasta su estado líquido y verterlo sucesivamente en un molde. El molde y el metal se dejan enfriar hasta que el metal líquido se solidifica, momento en el que la pieza se extrae del molde. La fundición de yeso, hormigón o resina suele utilizar moldes desechables de un solo uso o moldes multiuso hechos de piezas pequeñas y rígidas, como el caucho de látex.

La empresa Gestión de Compras [8] expone cuatro métodos de moldeo por fundición: moldeo a presión, moldeo a la cera perdida, moldeo por gravedad, y moldeo en arena. Para esta simulación, los dos métodos de interés son el moldeo por gravedad y el moldeo en arena.

El moldeo por gravedad, también llamado “fundición en coquilla”. El metal fundido se vierte desde un recipiente en el molde cuya cavidad se llena solo por gravedad y cuyo llenado puede ser controlado por la inclinación de la matriz. Este proceso tiene un mejor acabado de superficie que el moldeo de arena, así como mejores propiedades mecánicas debido a la rápida solidificación de la pieza.

El moldeo en arena se caracteriza por usar arena como material para el molde. Permite lotes más pequeños que el moldeado permanente y a un coste muy razonable. Aunque es menos preciso que otros métodos y tiende a necesitar mecanizado, la arena es un material refractario muy abundante en la naturaleza y que, mezclada con arcilla, adquiere cohesión y moldeabilidad sin perder la permeabilidad que posibilita evacuar los gases del molde al tiempo que se vierte el metal fundido. Por esta razón, es el proceso más común.

La fundición es empleada para fabricar juntas, tuercas, tuberías, válvulas, accesorios, piezas que se utilizan en multitud de sectores como automoción, aeroespacial, ferroviario, construcción, agricultura, minería, maquinaria, defensa, plantas industriales, eléctrico, electrodomésticos. Los metales más comunes utilizados en fundición son el acero, hierro, aluminio, cobre, zinc, magnesio, titanio, zamak, entre otros.



(a) Proceso de fundición



(b) Piezas fabricadas por fundición

Figura 18: Fundición

El proceso de fundición en arena se compone de varias etapas como lo propone la empresa Gestión de Compras [9] y el blog Quimica.es [10]:

1. **Diseño del modelo:** El proceso comienza con un modelo, el cual es una réplica de la pieza deseada, excepto por el hecho de que es ligeramente más grande para permitir la contracción del metal durante la solidificación y enfriamiento.
2. **Compactación de la arena alrededor del modelo:** se coloca una caja de moldeo y se llena con arena. Después, se aplica presión a la arena para compactar firmemente contra la cara del modelo. Al compactarse la arena, ésta mantiene y muestra la forma exacta del modelo después de que se extraiga del molde.
3. **Colocación de los machos o núcleos:** Si la pieza que se quiere fabricar es hueca, se colocan machos en la mitad inferior del molde que eviten que el metal fundido rellene dichas oquedades. Después la sección o mitad superior del molde se fija en su lugar y entonces el molde se encuentra ya cerrado y listo para verter el material fundido.
4. **Colada:** Vertido del material fundido. La entrada del metal fundido hacia la cavidad del molde se realiza a través de la copa o bebedero de colada y varios canales de alimentación.
5. **Enfriamiento y solidificación:** Esta etapa es crítica, pues un enfriamiento excesivamente rápido puede provocar tensiones mecánicas en la pieza, e incluso la aparición de grietas, mientras que si es demasiado lento disminuye la productividad.
6. **Desmolde:** Rotura del molde y extracción de la pieza. En el desmolde también debe retirarse la arena del macho. Toda esta arena se recicla para la construcción de nuevos moldes.
7. **Desbarbado:** Consiste en la eliminación de los conductos de alimentación, mazarota y rebarbas procedentes de la junta de ambas caras del molde.
8. **Acabado y limpieza:** Se limpia la pieza de los restos de arena adheridos. Posteriormente, la pieza puede requerir mecanizado, tratamiento térmico, etc.

Para realizar este proceso se requiere preparar la arena. Existen diferentes preparados de arena, el más utilizado es el de “arena verde” cuya composición típica es una mezcla de arena (normalmente Sílice), arcilla (Bentonita), agua, aglutinantes y, en algunos casos, Antracita. El término “verde” no es por su color, sino porque indica la presencia de humedad en la arena y que el molde no es horneado o secado. Los moldes fabricados en arena verde resultan los menos costosos y, consecuentemente, son los más utilizados.

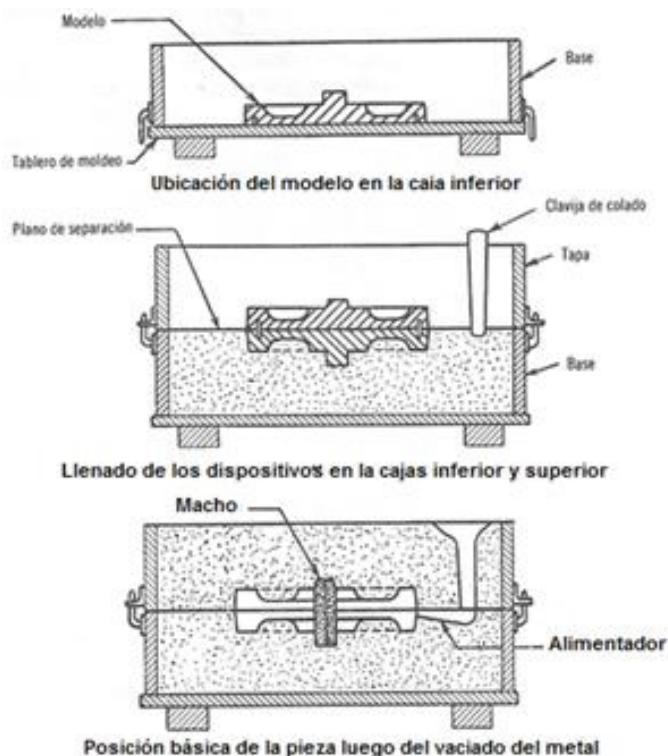


Figura 19: Etapas de la fundición

El proceso de fundición por gravedad, también conocido como moldeo en coquilla o moldeo en molde permanente, consiste en verter el metal en un molde permanente a presión atmosférica, como lo explica la empresa Gestión de Compras [11]. Los moldes para el moldeo por gravedad son normalmente de hierro fundido o acero y la mayoría de ellos se manipulan manualmente, pero para altos volúmenes de producción existen mecanismos neumáticos o hidráulicos para abrir y cerrar los moldes de manera automática, aunque la colada y las operaciones de acabado se siguen haciendo de forma manual.

Las etapas del moldeo por gravedad son:

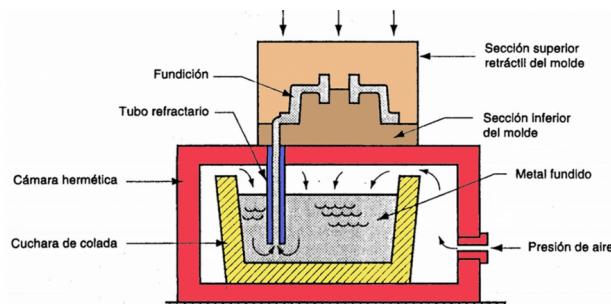
1. Preparación del molde
2. vertido
3. Enfriamiento
4. Desmolde

5. Acabado

A diferencia de los moldes de arena, los moldes de metal no son porosos, por lo que son necesarios conductos de ventilación para que los gases se dispersen durante el llenado. Además, una capa de grafito se aplica al molde para reducir el choque térmico y reducir la velocidad de solidificación.

La primera colada se vierte con el molde a temperatura ambiente, pero la temperatura del molde se eleva gradualmente después de cada ciclo y se estabiliza al cabo de unos pocos. Por tanto, los parámetros de diseño y del proceso deben ser diseñados teniendo en cuenta la dilatación debida a esta mayor temperatura.

La fundición por gravedad puede producir piezas complejas, incluso con cavidades y pequeños agujeros gracias a machos metálicos o de arena. Además, el moldeo por gravedad es adecuado para pequeñas y medianas piezas de fundición con un espesor uniforme y pocos o ningún socavado. El molde de metal permite una mejor estabilidad dimensional y gran acabado superficial en comparación con el moldeo en arena, pero el volumen de producción debe ser suficiente para justificar el coste de los utillajes.



El diagrama muestra cómo se usa la presión del aire para forzar el metal fundido, dentro de la cuchara de colada, hacia la cavidad molde. La presión se mantiene hasta que solidifica la fundición.

Figura 20: Fundición por gravedad

Para llevar a cabo un proceso de fundición por gravedad con excelente calidad, ya sea para una producción de volumen bajo, medio o alto, se requiere de una maquinaria especializada como las que ofrece la empresa ItalPresseGauss [12].



(a) Carrusel. Volumen de producción alto (b) Célula lineal. Volumen de producción medio (c) Célula flexible. Volumen de producción bajo o medio

Figura 21: Máquinas de fundición por gravedad

2.2. Métodos y técnicas

La simulación de inyección fue realizada para la pieza de la figura 22 en el software Altair Inspire Cast.

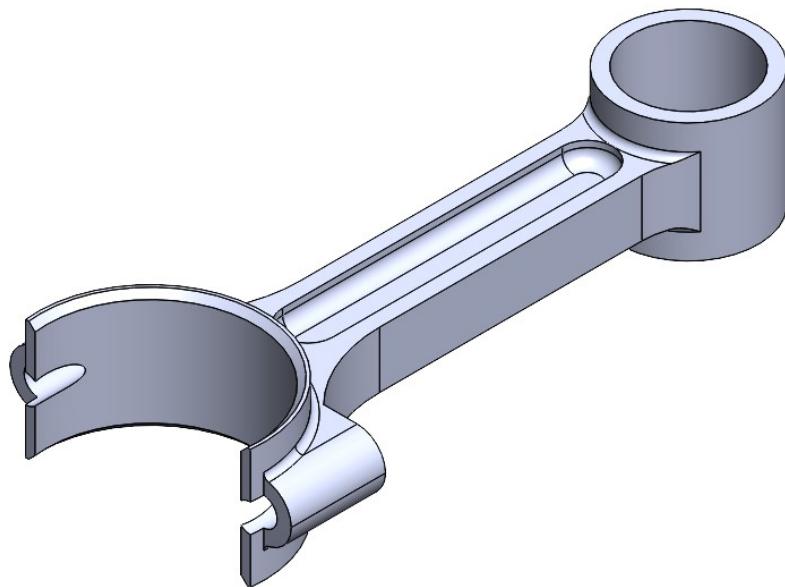


Figura 22: Pieza para simulación de fundición

Como se puede observar, la pieza corresponde a una biela. Como lo indica la página de Renting Finders [13], la función principal de estas es la transmisión de la presión que producen los gases sobre el pistón hacia el cigüeñal. Se trata del eslabón de esa cadena que convierte el movimiento lineal alternativo en rotativo uniforme.

Como lo señala David Plaza en una entrada para el blog motor.es [14], las bielas tienen que ser muy resistentes a las tensiones y temperaturas, pero también ligeras en la medida de lo posible al ser un elemento móvil dentro del motor. Los materiales más habituales son las aleaciones con base de acero, titanio o aluminio, utilizándose en casi todos los casos la técnica de la forja y, en menor medida, el mecanizado.

En este orden de ideas, para la simulación de inyección, se especifica inicialmente el material de la pieza. El acero se encuentra en la biblioteca de materiales del software Altair Inspire Cast, por tanto, la temperatura de fusión ya se encuentra especificada dentro del software como se muestra en la figura 23.



Figura 23: Definición del material

Una vez definido el material y sus propiedades, se verificaron los parámetros del proceso de

fundición por gravedad. Las etapas del proceso de inyección dentro del software están divididas en 3: Filling, Solidification, y Demolding. Para este caso, únicamente se estudió la etapa de llenado (Filling), dejando los valores establecidos automáticamente por el software.

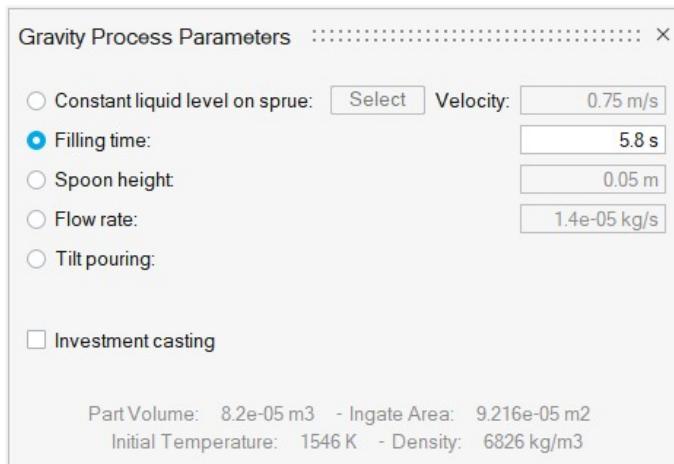


Figura 24: Parámetros para la fundición por gravedad

El tiempo de llenado (Filling time) es el tiempo en el que tarda el material fundido en llenar el volumen del molde. Este proceso no es tan rápido como el moldeo por inyección, pues el material simplemente se vierte a una velocidad constante, dependiente completamente del ángulo de inclinación del cucharón. En este caso, el proceso de llenado tarda 5.8 segundos a una velocidad de vertimiento (Velocity) de 0.75 m/s, una altura de cuchara (distancia entre el cucharón y el molde cuando se vierte el líquido) de 0.05 metros, y un caudal de 1.4e-5 kg/s.

Por último, se definió un punto de entrada en el pie de la biela con la gravedad definida en el eje z negativo del sistema coordenado del software, como se observa en la figura 25.



Figura 25: Entrada para la fundición de la pieza

2.3. Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos con la simulación de inyección para las variables de temperature, pressures, filling time, velocity, solid fraction, last air, mold erosion, y cold shuts.

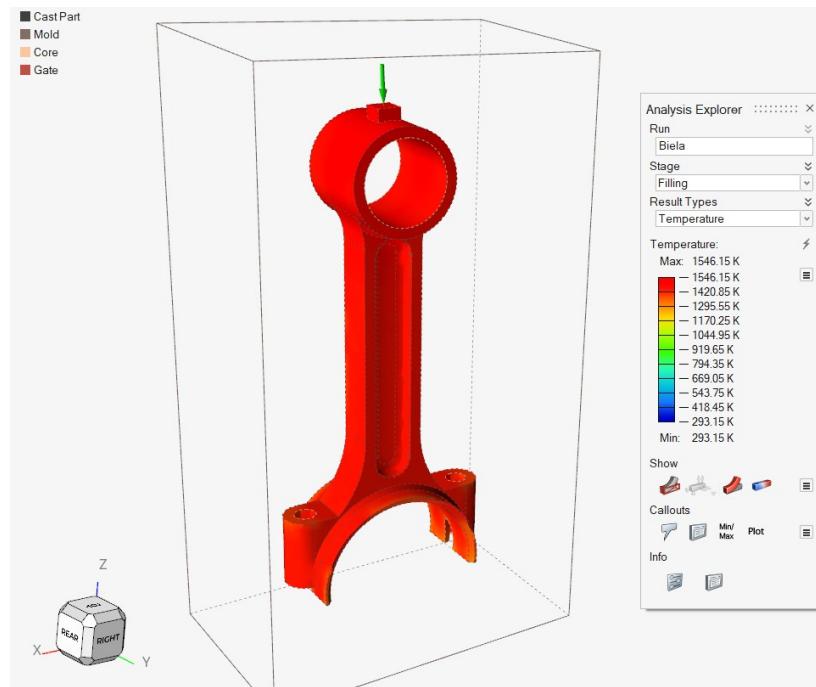


Figura 26: Filling temperature

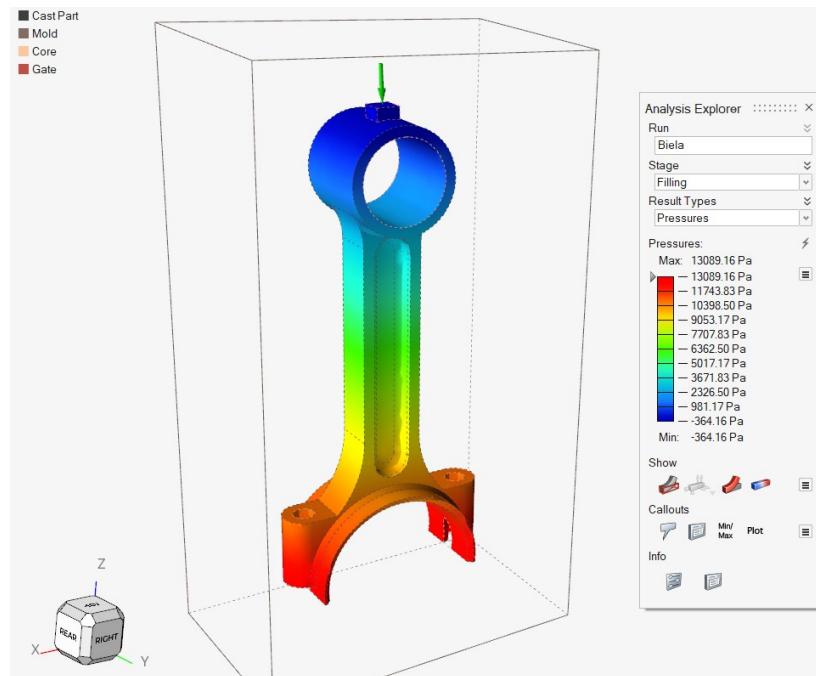


Figura 27: Filling pressures

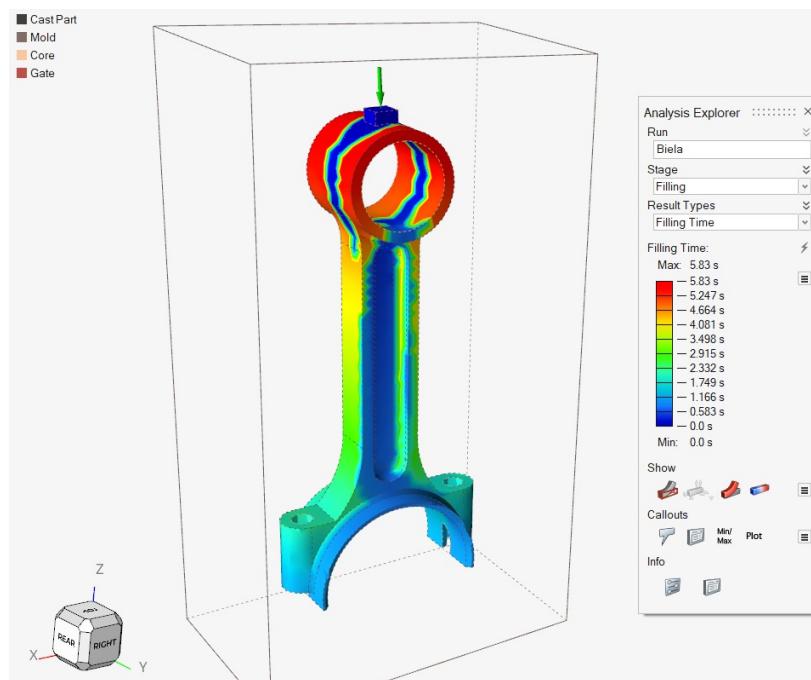


Figura 28: Filling time

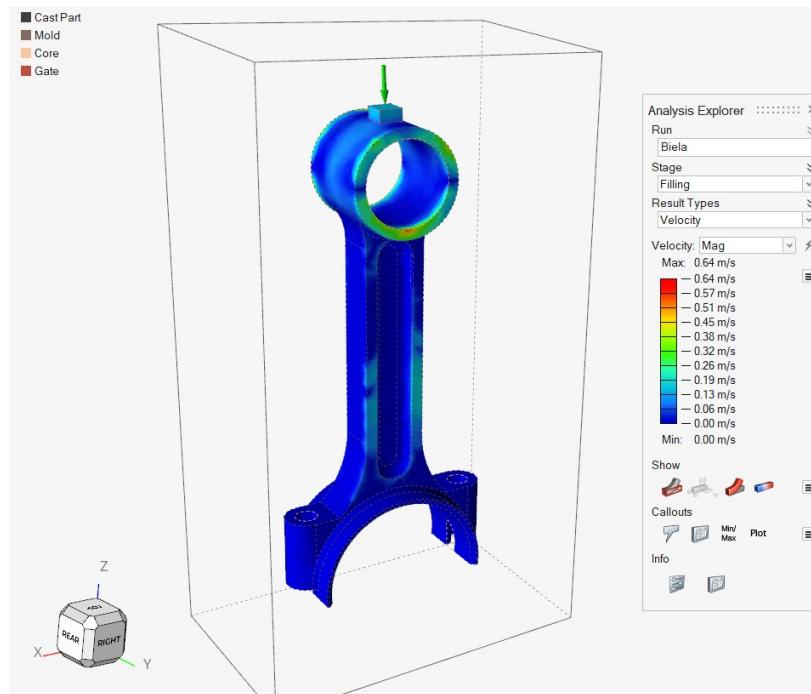


Figura 29: Filling velocity

2.4. Análisis de resultados

De la gráfica de temperatura de llenado 26 se puede apreciar que la temperatura del acero fundido oscila entre un máximo de 1546.15 K y un mínimo de 293.15 K. La temperatura es uniforme a lo lar-

go de toda la pieza, lo que indica que es poco probable que se produzcan imperfecciones debido a esto.

De la gráfica de presión de llenado 27 se puede apreciar que la presión máxima se presenta en los puntos más lejanos a la entrada, con 13089.16 Pa de presión. Este resultado tiene sentido, pues como es una fundición por gravedad, los puntos más alejados de la entrada son los que soportan el resto de material encima de ellos.

De la gráfica de tiempo de llenado 13 se identifica un tiempo de llenado máximo de 5.83 segundos. Las zonas que se llenan en menor tiempo son las más alejadas a la entrada, pues la pieza se encuentra vertical, la última zona en llenarse es la contigua a la entrada.

Con base en la gráfica 29, la velocidad de llenado es uniforme a lo largo de toda la pieza. Se requiere que este valor sea uniforme a lo largo del proceso para generar resultados de alta calidad, sin imperfecciones como los cierres fríos (cold shuts) o últimos aires (last air).

3. Simulación Altair Inspire FORM

3.1. Introducción

Como lo plantea la empresa Gestión de Compras [15], La embutición es un proceso de conformado plástico para chapa metálica. Esta operación consiste en transformar una chapa metálica plana en una pieza tridimensional.

Para llevar a cabo la embutición se utiliza un conjunto de punzón y matriz. Dicho punzón tiene la forma deseada de la base de la pieza a conformar. La cavidad de la matriz coincide con la forma del punzón, siendo esta un poco más ancha para permitir su paso y el del material dejando una holgura. Esta holgura debe ser suficiente para permitir el paso del material y evitar que este se corte en las zonas de mayor tensión.

La pieza de chapa en bruto se sujetó bajo presión sobre el orificio de la matriz. El punzón es empujado hacia la chapa, forzando a esta última a obtener la forma de la cavidad de la matriz. Las piezas fabricadas mediante embutición no suelen tener formas complejas, siendo necesario realizar el proceso en varias fases si estas lo fueran.

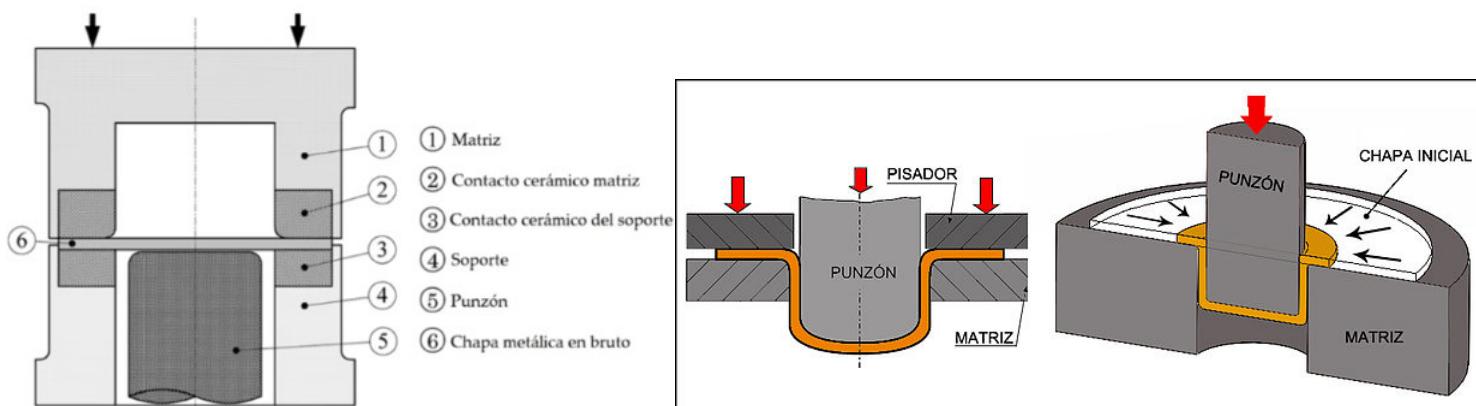


Figura 30: Proceso de embutición

Para llevar a cabo este proceso industrial son necesarias prensas hidráulicas o mecánicas. Las prensas hidráulicas son capaces de controlar el soporte de la chapa aparte del punzón, mientras que las mecánicas aportan una mayor velocidad. Una excelente opción para hacer un proceso de embutición profunda es con la máquina desarrollada por la empresa TSINFA [16] mostrada en la figura 31.



Figura 31: Máquina de embutición profunda de 150 toneladas

Estas máquinas cuentan con cuatro componentes principales como lo señala la empresa SOME [17]:

- **Matriz de embutición:** conjunto de componentes ensamblados y que pueden moverse entre sí.
- **Punzón:** Herramienta de acero (material endurecido) con la forma interior de la pieza que se pretende obtener.
- **Pasadura:** Herramienta de acero, también endurecido, con la misión de amoldar la chapa a la forma del punzón de una manera progresiva y desde el exterior.
- **Pisador:** Herramienta de acero endurecido. Su función es regular la presión de pisada sobre la chapa y contra la pasadura, para balancear su fluencia/deslizamiento y evitar arrugas y roturas.

El embutido tiene un gran volumen de producción y una buena precisión dimensional, pero este proceso al ser de deformación plástica genera muchas tensiones en el material, pudiendo causar defectos como arrugas o fracturas. Para evitar esto es necesario asegurarse que tenemos una velocidad de embutido aceptable, una apropiada lubricación entre material y matriz y la fuerza correcta en el soporte.

3.2. Métodos y técnicas

La simulación de inyección fue realizada para la pieza de la figura 32 en el software Altair Inspire Form.

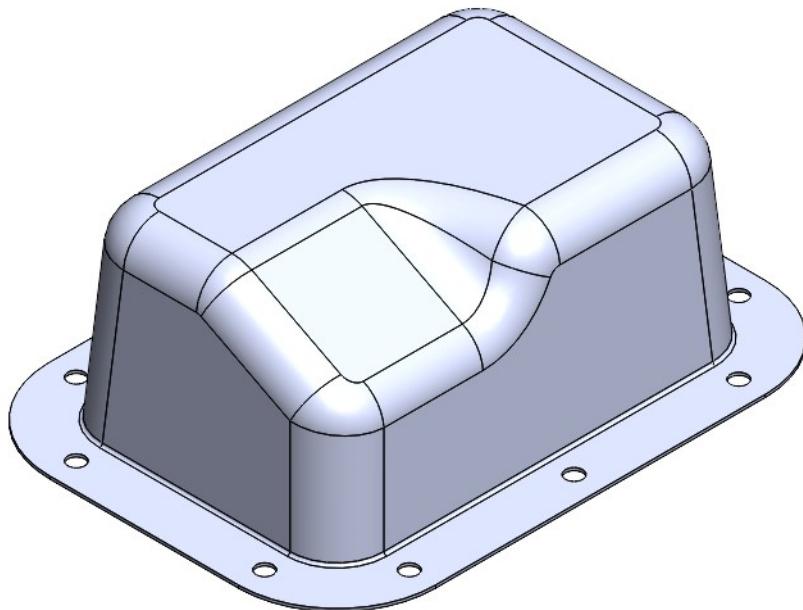


Figura 32: Pieza para simulación de embutición

Como se puede observar, la pieza corresponde a un cárter de aceite. David Plaza en una entrada para el blog Motor.es [18] indica que la función principal del cárter es alojar el aceite que lubrica el motor, así como proporcionar protección y rigidez al motor

En el blog Motor [19] se especifica que el cárter es una pieza metálica fabricada por aleaciones ligeras de aluminio o de chapa de acero.

En este orden de ideas, para la simulación de inyección, se especifica inicialmente el material de la pieza. El acero se encuentra en la biblioteca de materiales del software Altair Inspire Form, por tanto, la temperatura de fusión ya se encuentra especificada dentro del software como se muestra en la figura 33.

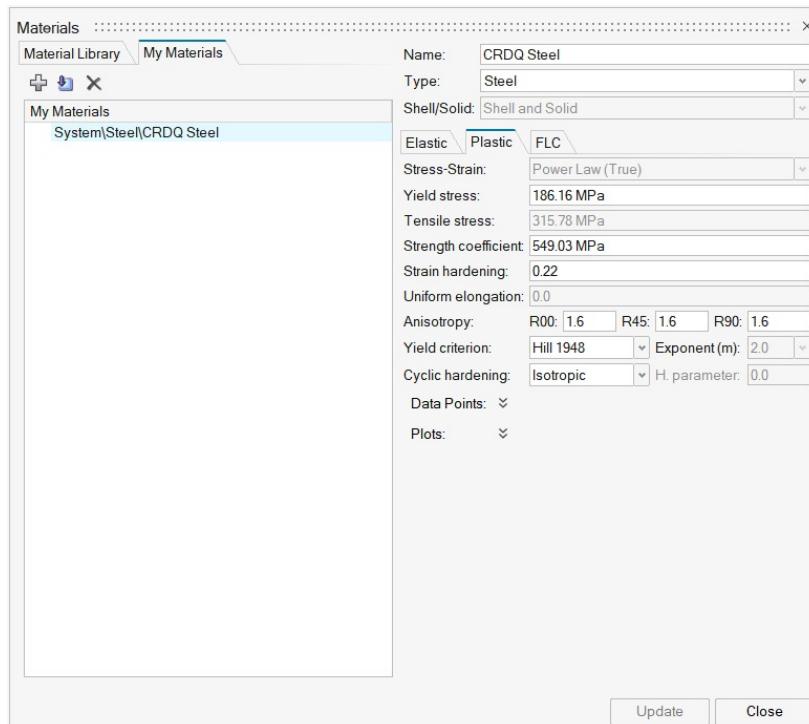


Figura 33: Definición del material

Una vez definido el material y sus propiedades, se aplicó una restricción de pisador (blankholder) de 1.345e6 N, las cuales, según el manual de Altair Inspire Form [20], son las superficies de sujeción superior e inferior que controlan el flujo de metal alrededor de la forma que se producirá en una operación de estampado.

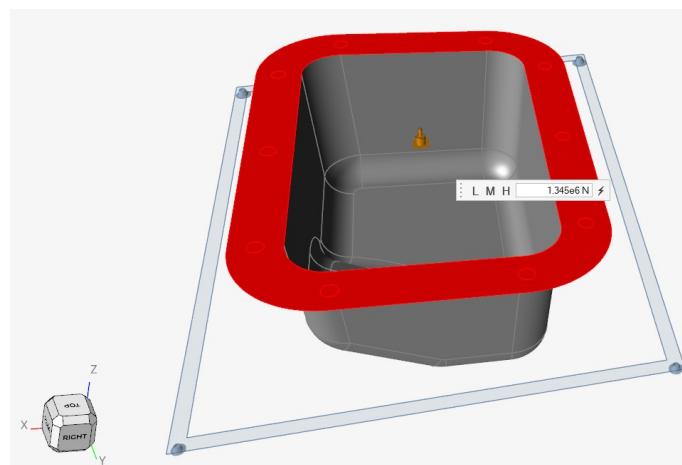


Figura 34: Restricción para la simulación

3.3. Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos con la simulación de inyección para las variables de thinning, formability, major strain, displacement.

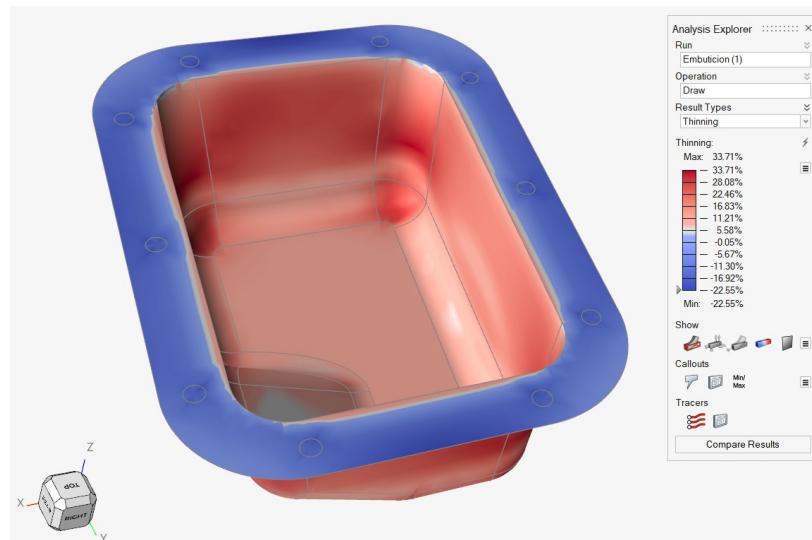


Figura 35: Draw thinning

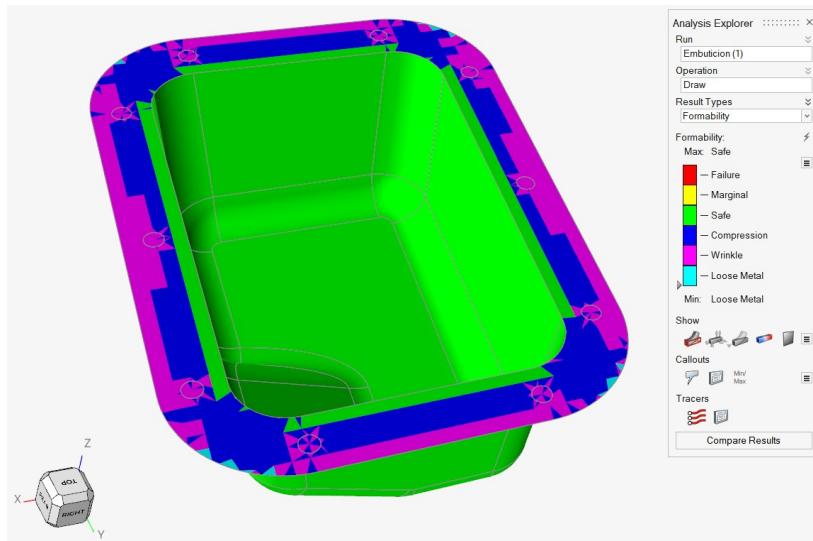


Figura 36: Draw formability

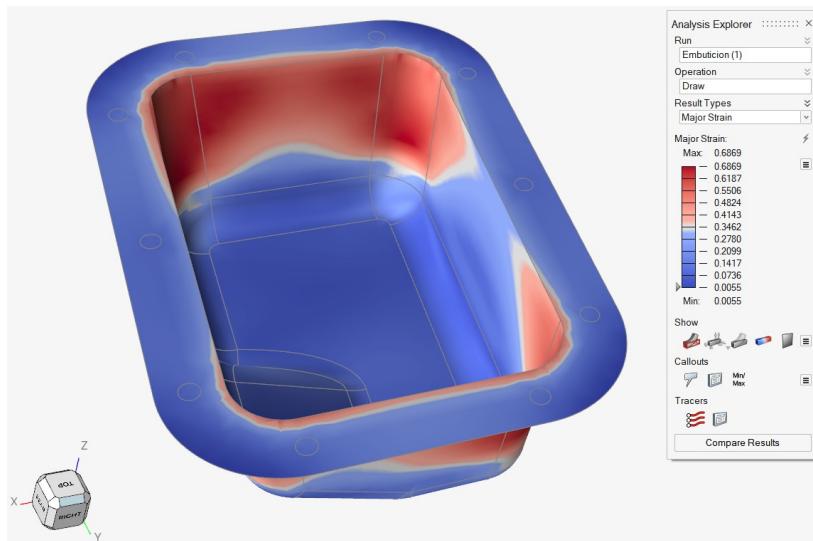


Figura 37: Draw major strain

3.4. Análisis de resultados

De la gráfica de adelgazamiento 35 se puede apreciar que los porcentajes son positivos en la parte interior de la pieza. Esto significa que se presenta una reducción en el grosor, que podría ser preocupante por el rendimiento de la parte bajo carga de fatiga, ya que las regiones más delgadas en la pieza sufrirán tensiones más altas en comparación con el resto de la pieza. No obstante, el porcentaje no es tan elevado, por tanto, no es tan preocupante.

De la gráfica de formabilidad 36 se puede apreciar que la formabilidad es segura en toda la parte interna de la pieza, la cual es la parte funcional y la que debe obligatoriamente tener una excelente calidad. Por otra parte, la sección donde se aplican los pisadores presentan arrugas donde se puede

presentar una posible falla. No obstante, ya que esta sección se desecha, no es muy importante que la tenga la misma calidad que las demás zonas.

De la gráfica de tensión principal 37 se identifican zonas donde hay una tensión principal máxima de 0.6869. Esta tensión representa la deformación de la chapa inicial con respecto al producto final, por tanto, es en las zonas rojas donde se produce un mayor estiramiento del material y si es excesivo, se pueden generar fallas.

Referencias

- [1] D. R. Muñoz, “Moldeo por inyección: todo lo que necesita saber,” 2023.
- [2] ReyPlas, “Proceso de inyección de plástico,” 2018.
- [3] GESTER, “La maquinaria de inyección en el proceso de moldeo de plástico,” n.d.
- [4] Vanto, “¿qué es una máquina de moldeo por inyección?,” 2019.
- [5] Alser, “Usos de abs,” n.d.
- [6] Altair, “Process parameters,” n.d.
- [7] D. Systemes, “Fundición,” n.d.
- [8] G. de Compras, “Fundición,” n.d.
- [9] G. de Compras, “Moldeo en arena,” n.d.
- [10] Quimica.es, “Fundición,” n.d.
- [11] G. de Compras, “Moldeo por gravedad,” n.d.
- [12] ItalPresseGauss, “Máquinas de fundición por gravedad,” n.d.
- [13] R. Finders, “Biela,” n.d.
- [14] D. Plaza, “¿qué es una biela? función y partes,” n.d.
- [15] G. de Compras, “Embutición,” n.d.
- [16] TSINFA, “Prensa hidráulica de embutición profunda,” n.d.
- [17] SOME, “Descubre el proceso de embutición de chapa metálica,” 2018.
- [18] D. Plaza, “¿qué es el cárter? funcionamiento y partes,” n.d.
- [19] Motor, “Cárter, usos y partes,” n.d.
- [20] A. I. Form, “Apply constraints,” n.d.