



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Mecánica

**DISEÑO DE UN TANQUE TIGER II PARA MODELISMO**



**Volumen I**

**Memoria**

**Autor:** Juan Kader Rey Villar  
**Director:** Miguel Brigos Hermida  
**Departamento:** EGE  
**Convocatoria:** Junio 2017



## Resum

El objecte d'aquest treball, tal i com indica el seu títol, consisteix en el disseny d'una maqueta a escala d'un tanc Tiger II alemany de la II guerra mundial per a modelisme. El mètode escollit per a la seva fabricació en sèrie es la injecció de plàstic.

Aquest treball s'enfocarà en el correcte disseny de les peces per a que siguin desmollables, els motlles, i definir uns paràmetres per al correcte compliment dels mateixos, tals com el temps d'ompliment o la pressió màxima a la que la injectora haurà de treballar, amb el objectiu de minimitzar els defectes abans no tinguin un gran impacte en el procés de fabricació.

D'altra banda, s'elaborarà un pressupost del tanc complet y es realitzarà un estudi de mercat per a situar el producte podent així estimar una previsió de vendes. A més a més, el producte haurà de complir amb les normatives aplicables.

Aquest treball té doncs com a objectiu, validar el disseny de les peces per mitjà de programes de simulació, optimitzar el plantejament inicial, seleccionar el material entre el ampli catàleg de termoplàstics i realitzar un pressupost total del tanc.

## Resumen

El objeto de este trabajo, como su título indica, consiste en el diseño de una maqueta a escala de un tanque Tiger II alemán de la II guerra mundial para modelismo. El método escogido para su fabricación en serie es la inyección de plástico.

Este trabajo se enfocará en el correcto diseño de las piezas para que sean desmoldables, los moldes, y definir unos parámetros para el correcto llenado de los mismos, tales como tiempo de llenado o presión máxima a la que la inyectora deberá trabajar, con el objetivo de minimizar defectos antes de que tengan un impacto grave en el proceso de fabricación.

Por otra parte, se elaborará un presupuesto del tanque completo y se realizará un estudio de mercado para situar el producto pudiendo así estimar una previsión de ventas. Además, el producto deberá cumplir con las normativas aplicables.

Este trabajo tiene como objetivo pues, validar el diseño de las piezas por medio de programas de simulación, optimizar el planteamiento inicial, selección del material entre el amplio catálogo de termoplásticos y realizar un presupuesto total del tanque.



## **Abstract**

The main goal of this project, as stated in its headline, consists in the design of a scale model of a german Tiger II tank from WWII for modeling. The selected method for its serial production it's plastics mold injection.

This project will focus in the correct design of the pieces for them being easily demouldables, the molds themselves, and defining a set of parameters for the correct filling of said molds, such as filling time and maximum pressure under the injection machine will need to work, with the objective of minimizing defects before they have a big impact in the fabrication process.

On the other hand, a budget of the complete tank will be elaborated and a market study will be made to situate the product and enabling a sells estimation. Furthermore, the product should comply with the regulations in force.

This project then, has the objective of validating the design of the pieces by means of software simulation tools, optimizing the initial approach, material selection between the widespread catalogue of thermoplastics and setting a total budget of the tank.



## **Agradecimientos**

Quisiera agradecer este trabajo a todas aquellas personas que me han tenido que aguantar durante estos meses difíciles.

A mi pareja por estar siempre allí para animarme cuando lo veo todo negro.

A mi tutor por la ayuda ofrecida durante la realización de este trabajo.

Y a mi familia por haberme ayudado durante todos estos años de carrera.

A la empresa Hasco Ibérica Normalizados S.L.U. por su asistencia personalizada en la elección de los componentes.





# Índice.

<b>RESUM</b>	<b>I</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>V</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
1.1. Objetivos del trabajo.....	3
1.1.1. Objetivo principal. ....	3
1.1.2. Objetivos específicos. ....	3
1.2. Alcance del trabajo. ....	3
<b>2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO.</b>	<b>5</b>
2.1. Introducción histórica. ....	5
2.2. El amplio mundo de los modelos a escala.....	6
2.3 Características de un modelo a escala. ....	8
<b>3. GENERALIDADES DEL PROCESO DE INYECCIÓN.</b>	<b>9</b>
3.1. Definición. ....	9
3.2. Máquinas convencionales o de husillo.....	9
3.3. El ciclo de inyección. ....	11
3.4. Características de las máquinas de inyección. ....	13
3.4.1. Capacidad de inyección.....	13
3.4.2. Capacidad de plastificación.....	13
3.4.3. Presión de inyección.....	13
3.4.4. Velocidad de inyección.....	14
3.4.5. Fuerza de cierre. ....	15
3.5. Partes de un molde. ....	15
3.6. Tipos de defectos. ....	16
3.6.1. Líneas de soldadura.....	16
3.6.2. Rebabas. ....	17
3.6.3. Rechupes. ....	17
3.6.4. Vacantes. ....	17
3.6.5. Contracción no uniforme. ....	18
3.6.6. Quemaduras en la superficie del material.....	18

3.6.7.	Burbujas de aire. ....	18
3.6.8.	Marcas del punto de inyección.....	19
3.6.9.	Efecto jetting (gusanillo). ....	19
3.6.10.	Efecto stick-slip (irisados circulares o micro-alas). ....	20
3.6.11.	Falta de llenado completo de la pieza. ....	20
3.6.12.	Deformación por expulsión. ....	21
<b>4.</b>	<b>DISEÑO DE PIEZAS. _____</b>	<b>22</b>
4.1.	Obtención de medidas. ....	22
4.2.	Análisis del ángulo de salida. ....	23
4.3.	Tolerancias. ....	24
4.4.	Diseño de matrices. ....	25
<b>5.</b>	<b>DISEÑO DE MOLDES. _____</b>	<b>28</b>
5.1.	Dimensiones. ....	28
5.2.	Grosor de pared.....	28
5.3.	Ventilación. ....	28
5.3.1.	Ventilación por vacío. ....	29
5.4.	Expulsión.....	30
<b>6.</b>	<b>SELECCIÓN DE MATERIALES. _____</b>	<b>32</b>
6.1.	Materia prima. ....	32
6.2.	Molde.....	38
<b>7.</b>	<b>ANÁLISIS DEL MODELO. _____</b>	<b>39</b>
7.1.	Operaciones Previas. ....	39
7.1.1.	Control de la humedad en la granza y secado del material. ....	39
7.2.	Etapa de inyección.....	40
7.2.1.	Parámetros de la etapa de inyección. ....	40
7.2.2.	Resultados de flujo.....	45
7.3.	Empaquetado. ....	70
7.3.1.	Parámetros del empaquetado.....	70
7.3.2.	Resultados del empaquetado.....	71
7.4.	Deformaciones.....	76
7.4.1.	Parámetros de deformación.....	76
7.4.2.	Resultados de deformación.....	77
7.5.	Refrigeración.....	81
7.6.	Estudio de resistencia del material. ....	84

<b>8. ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL</b>	<b>86</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>87</b>
Valoración personal.....	87
Objetivos alcanzados.....	87
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>88</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.</b>	<b>89</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS Y GRÁFICOS.</b>	<b>93</b>







# 1. Introducción

Previo a comenzar con este proyecto, es importante destacar la motivación de la que surge este trabajo, sus objetivos y el alcance del mismo.

## 1.1. Objetivos del trabajo.

### 1.1.1. Objetivo principal.

El objetivo principal de este proyecto es elaborar un presupuesto de todas las piezas que conforman el tanque y de los costes de todo el proceso de fabricación.

### 1.1.2. Objetivos específicos.

Para poder cumplir con el objetivo principal es necesario definir una serie de objetivos concretos:

- Definir a quién va dirigido este producto.
- Definir las necesidades básicas que debe cumplir el producto, basándose en lo ofrecido por la competencia.
- Definir el proceso de fabricación a escoger.
- Diseñar con Solidworks cada una de las piezas, prestando atención para que sean desmoldables.
- Agrupar las piezas en matrices según compartan dirección de desmoldeo.
- Seleccionar los materiales de las piezas y los moldes.
- Definir los parámetros del proceso de inyección.
- Determinar los costes de todo el proceso y establecer un PVP.
- Realizar una estimación de ventas y amortización.

## 1.2. Alcance del trabajo.

Este proyecto se centrará únicamente en la fabricación del modelo a escala, sin inferir en los costes de adquisición de maquinaria, superficie, energía y patentes. No se realizará ningún prototipo para este proyecto.

No se trata de conseguir unos niveles de calidad elevados, es por ello, que se ha decidido minimizar en variedad de accesorios en favor de otros aspectos más importantes del proyecto. (Como puede ser la tripulación, herramientas de campo, etc).

Se acordará un presupuesto con una empresa externa para determinar los costes del packaging.



## 2. Estado del conocimiento.

En este capítulo se recogen toda una serie de consideraciones iniciales como punto de partida del proyecto. No se hará mucho ahínco en la competencia pues ésta se describe con mayor profundidad en el capítulo sobre estudios económicos.

### 2.1. Introducción histórica.

El Panzerkampfwagen Tiger Ausf. B, más comúnmente conocido como Tiger II o Tiger B, es un tanque pesado alemán utilizado por las fuerzas del eje durante la Segunda Guerra Mundial. También era conocido informalmente como Königstiger (del alemán, tigre de Bengala), traducido por las fuerzas aliadas como King Tiger o Royal Tiger.



*Figura 2.1: Tanque Tiger II capturado por tropas americanas. (1944).*

El Tiger II combinaba el grueso blindaje de su predecesor el Tiger I, con el blindaje inclinado del tanque medio Panther. Tenía un peso en torno a las 70 toneladas y estaba protegido por un blindaje que oscilaba entre 100-180mm en la zona frontal. Estaba dotado de un cañón largo KWK 43 de 88 mm L/71 y 3 ametralladoras MG 34 de 7,92 mm.

Fue usado en combate por primera vez por el 503º batallón de tanques pesados durante la campaña de Normandía el 11 de Julio de 1944.

El carro fue concebido inicialmente por la empresa Henschel & Son allá por el año 1937, la cual produjo 492 unidades de este modelo entre los años 1943-1945. El tanque tenía capacidad para 5 tripulantes y montaba un motor Maybach V12 gasolina de 700 CV. Podía alcanzar una velocidad máxima de 41'5 km/h en carretera y 20 km/h campo a través. Disponía de 2 orugas con 9 ruedas de apoyo intercaladas, ésta disposición dificultaba la incapacitación del tanque en caso de impacto directo.

Dos empresas se involucraron en el diseño del chasis, Henschel y Porsche, las cuales presentaron sus proyectos por separado, sin embargo la segunda perdió frente a la primera por utilizar demasiado cobre y un diseño de la torreta demasiado curvo, forma que desviaba los disparos y metralla hacia otras partes del tanque, lo que comúnmente se conoce como una trampa para disparos.

En combate, su fuerte blindaje y su cañón de gran alcance, capaz de atravesar blindajes enemigos de 100 mm de grosor a una distancia de 1500 m, le conferían una ventaja en combate. Sin embargo, su escasa producción aunada con la enorme extensión de frentes en los que luchaba Alemania hacía de este tanque un recurso demasiado escaso. En una posición defensiva, el King Tiger era casi imposible de destruir. Ofensivamente, tenía menos éxito debido a que quedaba demasiado expuesto a ataques aéreos. De todas formas, su blindaje lo hacía a prueba de otros tanques frontalmente y de armas antitanque de infantería desde cualquier ángulo.

Su velocidad era adecuada a su tamaño, incluso superior a ciertos tanques más ligeros enemigos. Aunque siempre ha existido la leyenda de que el Tiger II era un tanque lento y torpe en sus movimientos, esto se debe principalmente a la falta de conductores experimentados, muchos de los cuáles salían a practicar en primera línea de fuego. Generalmente se les había dado una formación sobre otro tipo de carro y después enviados directamente al frente sin apenas conocimiento del mismo. (Osprey Military, 1993).

## 2.2. El amplio mundo de los modelos a escala.

Ya sea por puro coleccionismo, escenificación o afición a un juego de mesa, existe una amplia oferta de modelos en diferentes escalas de todo tipo de maquinaria bélica con precios que van desde los 10€ hasta los 300€ aproximadamente.



Figura 2.2: Varios ejemplos de coleccionismo con diferentes propósitos.

El boom tecnológico causó un descenso de todas las ventas de productos de coleccionismo, pero a pesar de ello no es raro ver cada vez más gente, harta de la monotonía de una pantalla, buscar distracciones al aire libre o iniciarse en hobbies, con el fin de desconectar o relacionarse con gente que comparta una misma afición.

Existe una alta variedad de empresas que fabrican maquetas con el propósito de satisfacer esta necesidad, a veces creando varias versiones de un mismo modelo con diferentes niveles de calidad y

accesorios. A estas las acompañan todo un séquito de comercios que abastecen a los aficionados con pinturas, pegamentos específicos, materiales de escenografía, etc.

Entre ellas destaca el gigante japonés Tamiya, el cual roza las 300 referencias (sólo en tanques) y ofrece además toda una gama de pinturas y otros materiales. Fundada por Yoshio Tamiya en el año 1946 como aserradero y proveedor de madera. La alta disposición de materia prima derivó en toda una línea de productos fabricados en este material, entre ellos modelos a escala de barcos y aviones de madera. No fue hasta 1953 que decidieron abandonar la producción de madera estructural y centrarse en los modelos a escala.



*Figura 2.3: Tamiya Headquarters en Shizuoka, Japón.*

A mediados de los 50, se empezaron a importar modelos fabricados en plástico y las ventas de los productos en madera cayeron, así fue pues en el año 1959 empezaron la producción de productos en plástico. Su primer proyecto fue un desastre pues nunca se pudo recuperar el coste de producción de los moldes en metal y volvieron a la producción en madera, hasta que por fortuna el lanzamiento de un mini-kit de un coche de carreras tuvo un éxito descomunal y pudieron financiar la producción de su segundo kit en plástico. El tanque Panther.

Dicho tanque, tenía unas formas lineales fáciles de producir con la tecnología de la época. El tanque fue motorizado y venía con unas instrucciones claras que lo hacían sencillo de montar, gracias a esto gozó de buena reputación.

El tanque fue fabricado a escala 1:35, que se convirtió en un estándar de los modelos a escala por toda la industria en general.

No fue hasta el año 1964 que empezaron a producir sus propios moldes. En la actualidad, el diseño en CAD también ha sido introducido en el proceso. Hoy en día la mitad de su producción se realiza en Filipinas, pero tienen filiales en USA, Hong Kong y Alemania.

Entre otros logros, se les conoce por desarrollar componentes plásticos para los equipos Honda y Lotus de Fórmula 1 durante la década de los 90.

## 2.3 Características de un modelo a escala.

Generalmente los modelos a escala requieren montaje y pintado. Las piezas vienen separadas dentro de diferentes matrices, de las cuáles hay que cortar las piezas y limarlas. Las matrices vienen individualmente envueltas en bolsas de plástico, para que no se dañen con el roce entre las mismas. Dichas piezas vienen acompañadas de un manual de instrucciones y son numeradas para su correcto montaje.



Figura 2.4: Unboxing de un modelo a escala.

Se tratan en su mayoría de modelos fabricados en plástico, aunque no es raro ver componentes en metal con fines estéticos. En ocasiones el chasis principal, se fabrica en metal para dotar al modelo de más peso, o se rellena el interior con pesos muertos, todo con el fin de dar al modelo una sensación de robustez.

El precio se dispara cuándo por ejemplo, un tanque dispone de un chasis de metal, una gran variedad de accesorios en chapa y tripulantes, interior fielmente reproducido, kit de motor, texturas, etc.



Figura 2.5: Ejemplo de interior y texturas.

## **3. Generalidades del proceso de inyección.**

### **3.1. Definición.**

El moldeo por inyección consiste particularmente en introducir a presión un material plástico fundido bajo unas condiciones adecuadas dentro de una cavidad. El moldeo por inyección se aplica normalmente a resinas termoplásticas, pero con ciertas modificaciones, permite utilizarlo con materiales termoestables y elastómeros sintéticos.

En el proceso, el polímero fluye a través de los conductos o canales en estado líquido y llena una cavidad cuyas paredes están mucho más frías que el propio polímero, a pesar que éstas se precalientan a una temperatura superior a la ambiental.

El moldeo por inyección está enfocado a la producción masiva de piezas y es quizás el método de transformación más característico de la industria de los plásticos. Requiere una inversión inicial muy elevada, pero es con el que se puede conseguir un menor coste por pieza.

El proceso se divide en dos fases, en la primera tiene lugar la fusión del material y en la segunda la inyección del mismo en el molde. La manera de realizar estas dos fases es la que distingue unas máquinas de otras. (Beltrán y Marcilla, 2012).

Para comprender mejor el funcionamiento de estas máquinas, en este trabajo se describirá como funciona una máquina de inyección convencional.

### **3.2. Máquinas convencionales o de husillo.**

Las máquinas de husillo (Figura 3.1.) proporcionan un calentamiento uniforme del material así como un mezclado homogéneo. En estas máquinas la inyección del material se realiza desde la cámara de plastificación, la cual está provista de un husillo.

La rotación del tornillo transforma parte de la energía mecánica en calor por fricción, aunque las paredes siguen transmitiendo calor por conducción. La eficiencia en la transmisión de calor de estas máquinas resulta muy elevada respecto a las máquinas con pistón. Además, el tornillo se mueve axialmente para realizar la inyección.

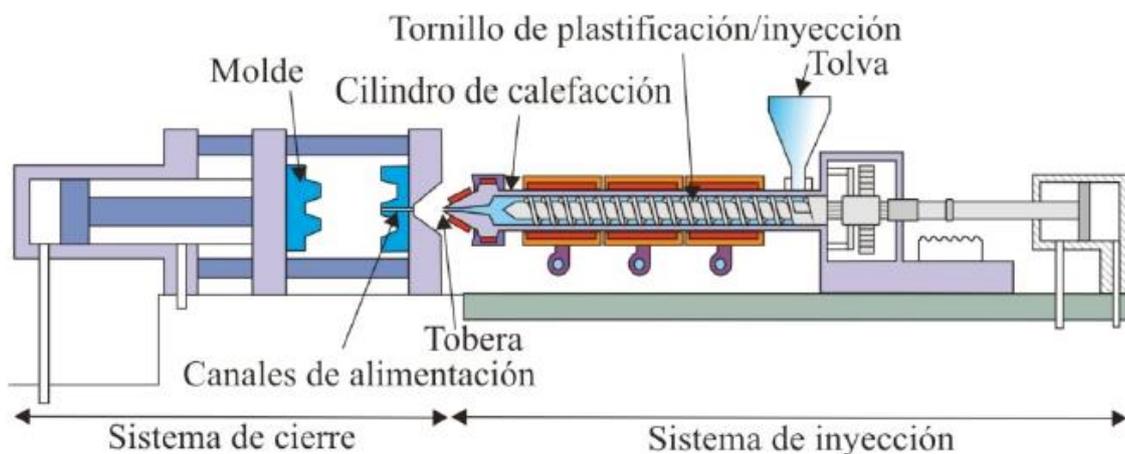


Figura 3.1: Máquina de inyección con tornillo. (Fuente: Beltrán y Marcilla).

En estas máquinas conforme el tornillo avanza, produce material fundido que se va acumulando en la parte anterior del mismo. El tornillo debe retroceder lentamente mientras gira. Una vez se dispone del suficiente material acumulado, se detiene el giro y se realiza un movimiento axial hacia adelante, con lo que se realiza la inyección del material fundido.

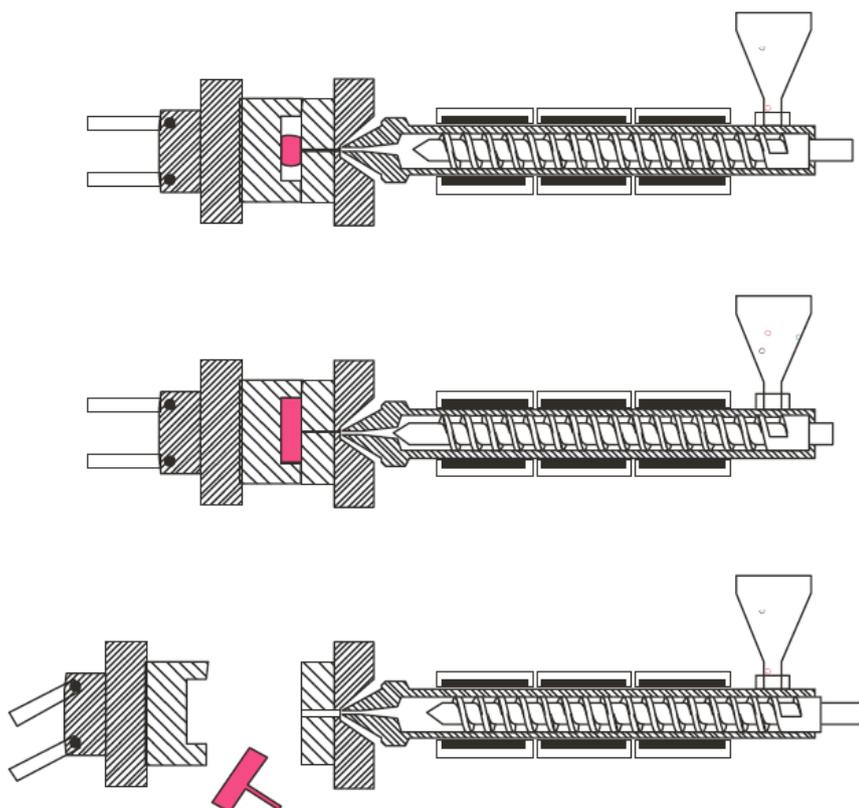


Figura 3.2: Secuencia de movimientos de una máquina de inyección convencional. (Fuente: Beltrán y Marcilla).

Un tornillo con movimiento axial tiene que vencer una gran resistencia para realizar la inyección. Por eso en ocasiones se combinan con un cilindro de inyección como el que se muestra en la figura 3.3. (Beltrán y Marcilla, 2012).

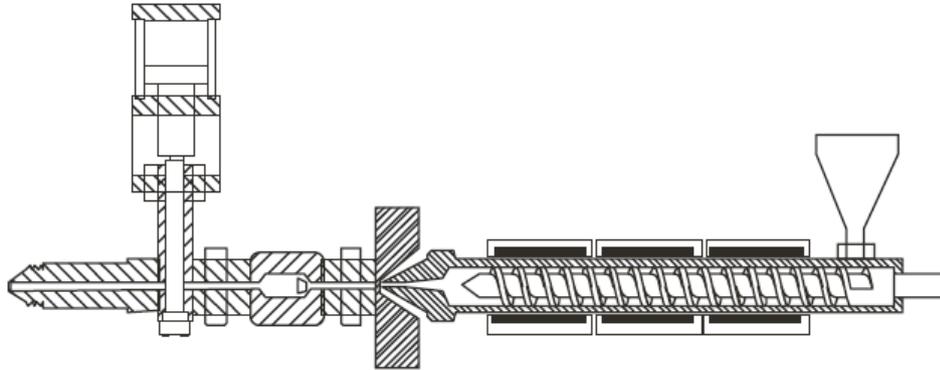


Figura 3.3: Máquina con tornillo preplastificador y pistón de inyección. (Fuente: Beltrán y Marcilla).

### 3.3. El ciclo de inyección.

Un ciclo de inyección convencional puede considerarse por los tiempos y movimientos siguientes:

- Tiempo de cierre del molde.** Durante el cual actúa el sistema de cierre, la máquina ejecuta el movimiento necesario y cierra el molde.
- Tiempo de avance de la unidad de inyección.** Durante el cual la unidad de inyección, que hasta ese momento se encuentra separada del molde, avanza y posa la boquilla sobre el bebedero (punto de entrada al molde).
- Tiempo de llenado o de inyección.** En el que el pistón o husillo avanza realizando la inyección del material. En este tiempo el molde se llena con el material fundido. El tiempo necesario para realizar la inyección depende del polímero empleado, de la temperatura que éste alcanza, de la velocidad de avance del husillo, del tamaño del molde y de los canales que ponen en comunicación el molde con el cilindro de inyección.
- Tiempo de compactación (o tiempo de moldeo o de mantenimiento).** Durante el cual el molde permanece cerrado y el polímero empieza a enfriarse en el molde. Cuando el material empieza a enfriarse se contrae, por lo que para mantener la presión en el molde durante este periodo se suele introducir lentamente algo más de material dentro de la cavidad del molde, lo que compensa la contracción. Este periodo puede variar entre unos segundos y varios minutos. El peso final de la pieza, su estabilidad dimensional y las tensiones internas que pudieran aparecer dependen de cómo se realice esta etapa, que finaliza en el momento en el que el material ocupa la entrada del molde se solidifica, de modo que ya no es necesario mantener la unidad de inyección en posición avanzada para seguir manteniendo la presión.
- Tiempo de retroceso de la unidad de inyección.** Cuando la entrada a la cavidad solidifica, la unidad de inyección retrocede, y comienza el movimiento rotatorio del husillo para plastificar

el material para la siguiente etapa, simultaneándose con la fase de enfriamiento, apertura del molde y extracción de la pieza y acelerando así el tiempo total del ciclo.

- f) **Tiempo de enfriamiento.** Necesario para enfriar el polímero que ocupa las cavidades del molde. Generalmente se toma este tiempo desde que acaba la etapa de compactación hasta que se abre el molde, sin embargo realmente el enfriamiento del material comienza tan pronto como el polímero toca las paredes frías del molde y finaliza cuando se extrae la pieza, por lo que el tiempo de enfriamiento tiene lugar durante las etapas de llenado y compactación.
- g) **Tiempo de apertura del molde.** Durante el cual se abre el molde. Este tiempo suele ser constante para cada máquina.
- h) **Tiempo de extracción de la pieza.** Durante el cual se sacan las piezas moldeadas de la cavidad de moldeo.
- i) **Tiempo con el molde abierto.** Que generalmente es muy corto, pero en ocasiones puede ser considerable, por ejemplo, es preciso si se colocan inserciones metálicas en el molde. (Beltrán y Marcilla, 2012).

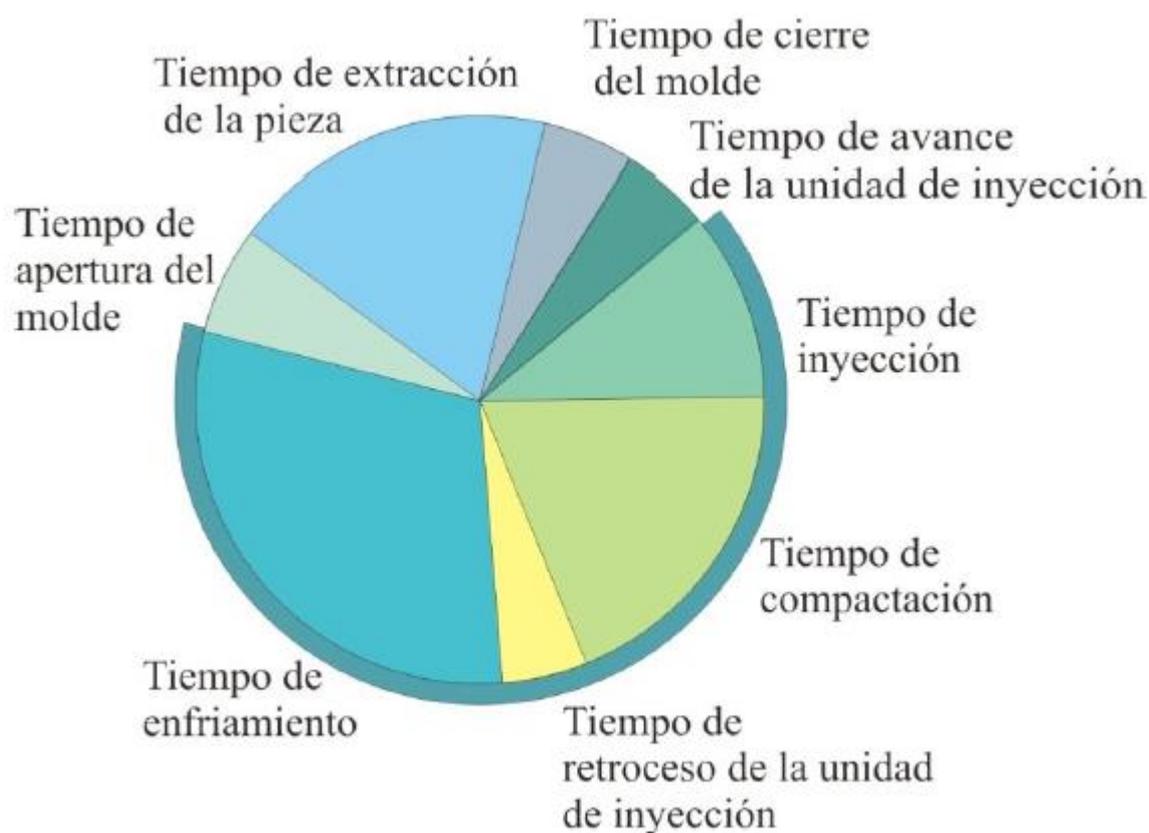


Figura 3.4: Duración relativa de las etapas del ciclo de inyección en una máquina convencional. (Fuente: Beltrán y Marcilla).

### 3.4. Características de las máquinas de inyección.

En este apartado se definen algunos conceptos y vocablos propios de las máquinas, moldes y tecnología del moldeo por inyección, que son relevantes para cualquier proceso de inyección.

#### 3.4.1. Capacidad de inyección.

Se entiende por capacidad de inyección la cantidad máxima de material que una máquina es capaz de inyectar de una sola vez en un molde a una presión determinada. La capacidad de inyección proporciona una idea de las posibilidades de la máquina considerada.

En una situación real la capacidad de inyección viene determinada por el diámetro y la carrera del pistón o husillo de inyección, así como por el tipo de molde utilizado, la temperatura que alcanza el polímero fundido, la presión a la que se inyecta y otras variables. Cuando se emplea un molde que es difícil de llenar, la capacidad real de inyección de la máquina es siempre algo menor que la indicada por el fabricante.

La unidad de inyección suele escogerse de forma que sea capaz de contener material suficiente para dos ciclos. En otras palabras, el 50% de la capacidad de inyección de un cilindro debería vaciarse en cada ciclo. Por otra parte, la cantidad de material introducida en el molde no debería ser inferior al 20% ni al 80% de la capacidad del cilindro, de modo que el tiempo de permanencia del material en la cámara de plastificación no sea excesivamente largo para evitar que el material se degrade, ni excesivamente corto para que el material no se encuentre plastificado. (Beltrán y Marcilla, 2012).

#### 3.4.2. Capacidad de plastificación.

La capacidad de plastificación es otro dato muy importante para evaluar las posibilidades de una máquina de inyección, sin embargo, no es fácil expresar numéricamente este concepto. Se puede definir, aunque ambiguamente, como la cantidad máxima de material que la máquina es capaz de plastificar por unidad de tiempo. Para comprender mejor este criterio es preciso aclarar que por “plastificar” un polímero debe entenderse el calentar éste lo suficiente para que alcance una temperatura a la que pueda ser inyectado. Evidentemente, la capacidad de plastificación depende de la eficacia de calefacción de la cámara de plastificación y de las propiedades térmicas del polímero que se calienta.

#### 3.4.3. Presión de inyección.

La presión de inyección se entiende por la medida en la cara delantera (a) del pistón o husillo. (Figura 3.5).

Como el husillo está activado por un pistón hidráulico al que es solidario, la fuerza en ambas caras (a) y (A) será la misma, y si (p) es la presión hidráulica y (P) la presión de inyección se cumplirá:

$$P = p(A/a) \quad (\text{Ec. 3.1.})$$

La presión ( $p$ ) puede leerse en un manómetro y la relación de superficies es una característica ( $A/a$ ) que debe conocerse. Las máquinas convencionales se construyen con relaciones  $A/a$  entre 8 y 9 generalmente. Esta presión de inyección  $P$  no es la misma que la máxima presión que se desarrolla en las cavidades de moldeo, la cual es bastante menor y puede tener valores solamente del 20% de la presión de inyección y aun menores, dependiendo de las características del molde utilizado. (Beltrán y Marcilla, 2012).

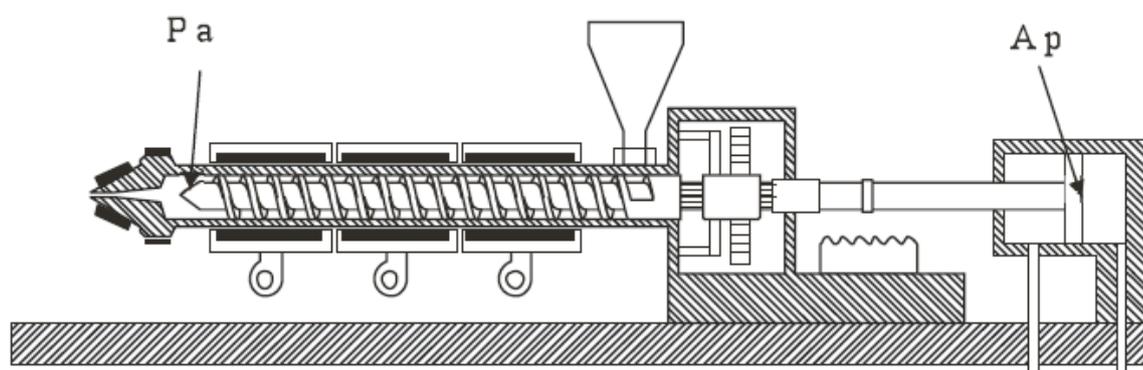


Figura 3.5: Posición en la que se determina la presión de inyección ( $P$ ), y la presión del sistema hidráulico ( $p$ ) que actúa sobre el tornillo. (Fuente: Beltrán y Marcilla).

#### 3.4.4. Velocidad de inyección.

La velocidad de inyección es el caudal de material que sale de la máquina durante el periodo de inyección; se expresa generalmente en  $\text{cm}^3/\text{s}$  y es una medida de la rapidez con que puede llenarse un molde dado. La velocidad de inyección viene principalmente determinada por la velocidad de avance del husillo, y también se puede expresar como el número de veces por unidad de tiempo que el tornillo puede efectuar su recorrido completo de ida y vuelta cuando la máquina funciona en vacío, es decir, sin molde y sin material de moldeo. Naturalmente esta característica de la máquina sólo depende de las demás características con que ha sido construida y en especial del tipo de sistema hidráulico utilizado.

En una situación real (con material y molde en la máquina) la velocidad de inyección del material dependerá de otros factores como la presión de inyección, la temperatura de la cámara de calefacción, las características del material utilizado y el camino que debe recorrer el polímero fundido hasta llegar a las cavidades de moldeo. (Beltrán y Marcilla, 2012).

### 3.4.5. Fuerza de cierre.

La fuerza de cierre es aquella que mantiene unidas las dos mitades del molde mientras en la cavidad de moldeo se desarrolla la máxima presión como consecuencia de su llenado. Como ya se ha mencionado, la presión en la cavidad de moldeo es mucho menor que la presión de inyección, si bien se desarrolla una fuerza que tiende a separar las dos mitades del molde y que viene dada por el producto de la presión en la cavidad de moldeo por el área proyectada sobre ésta.

Esta fuerza interna del molde puede ser muy grande y necesita ser contrarrestada por una fuerza de cierre que en todo momento sea superior a ella para asegurar así que el molde se mantiene cerrado durante la inyección. Cuanto mayor es la fuerza de cierre para mantener cerrado el molde tanto mayor es el área transversal de la pieza que puede moldearse, a igualdad de las demás condiciones. Las máquinas de inyección convencionales empleadas hoy en día son capaces de desarrollar fuerzas de cierre de más de 1000 toneladas. (Beltrán y Marcilla, 2012).

### 3.5. Partes de un molde.

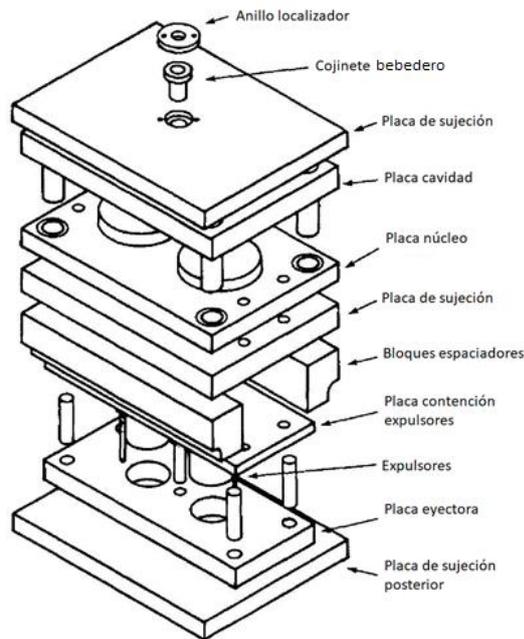


Figura 3.6: Partes de un molde. (Fuente: Boothroyd, G., Dewhurst, P., y Knight).

Un molde consiste básicamente de dos partes, una mitad móvil y una mitad estacionaria. En la parte estacionaria es donde se inyecta el polímero mientras que en la móvil se instala normalmente el sistema de eyección. La línea de separación entre las dos mitades es denominada la línea de partición.

El material es introducido en el molde a través de un canal bebedero centrado en el molde, tiene forma cónica para facilitar la expulsión de la pieza durante la apertura del mismo. En moldes multicavidad, el bebedero alimenta un sistema de canales que conducen a las cavidades por medio de aberturas.

La placa núcleo es la encargada de dar forma a la configuración interna de la pieza. Tiene una placa soporte, la cual se apoya sobre dos bloques a modo de pilares que dejan un espacio como morada del sistema de eyección. Durante la solidificación, la pieza se contrae, de modo que cuando se abre el molde, la pieza y mazarota (bebedero sólido) son arrastrados junto con la parte móvil de la pieza. Entonces es cuando se activa el eyector central que empuja la placa con los pines expulsores para empujar la pieza fuera del molde. (Boothroyd, G., Dewhurst, P., y Knight, 2010).

### 3.6. Tipos de defectos.

En este capítulo se definirán todos los defectos que pueden afectar al diseño de nuestra pieza. Naturalmente hay más, pero sólo nos centraremos en aquellos que realmente pueden estar presentes, pues de hecho algunos defectos se pueden obviar dadas las aplicaciones de nuestro modelo. (Ej: defectos en el brillo de la pieza).

#### 3.6.1. Líneas de soldadura.

Se producen cuando dos flujos de material se encuentran durante la fase de inyección del material. Si la presión y temperatura en la zona de unión es demasiado baja, estas líneas pueden ser visibles al ojo humano y además menoscaban la resistencia al impacto de la pieza.



Figura 3.7: Ejemplo de línea de soldadura.

### **3.6.2. Rebabas.**

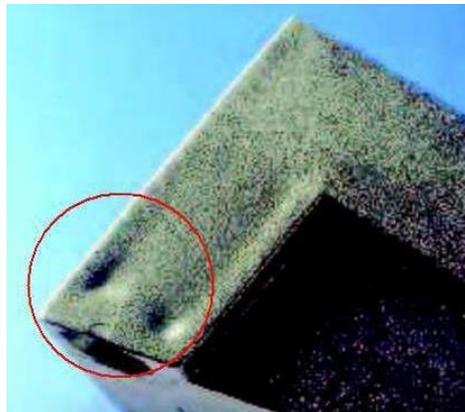
Si se sobrealimenta el molde con material durante la fase de mantenimiento de la presión, el material puede filtrarse entre las superficies de partición del molde, empeorando la calidad de la pieza.



*Figura 3.8: Ejemplo de rebabas.*

### **3.6.3. Rechupes.**

Mientras el polímero se enfría, la pieza se contrae. En algunos casos, el material es despegado de la pared del molde creando una depresión en la superficie de la pieza.



*Figura 3.9: Ejemplo de rechupes.*

### **3.6.4. Vacantes.**

Las vacantes suceden por las mismas causas que los rechupes, pero en este caso, las paredes de la pieza se han solidificado y no pueden ser despegados de la pared del molde. A medida que el material se contrae y el volumen mengua, una burbuja se crea en el interior del molde.

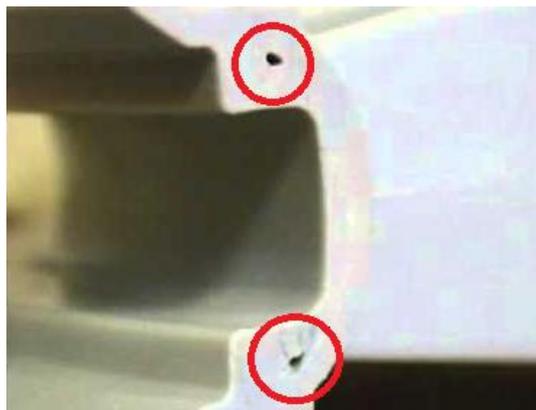


Figura 3.10: Ejemplo de vacantes.

### 3.6.5. Contracción no uniforme.

Este fenómeno se produce cuando existe un gradiente de temperaturas demasiado elevado entre diferentes puntos de la pieza, lo que deriva en diferentes tiempos de enfriamiento y por consiguiente que unas zonas se encojan más que otras.

### 3.6.6. Quemaduras en la superficie del material.

Cuando los moldes se cierran, un volumen de aire queda atrapado dentro de la cavidad. Durante la inyección del polímero, estos gases, si no se eliminan, se comprimirán y sobrecalentarán. Dicha temperatura puede aumentar lo suficiente como para causar la autoignición de los componentes volátiles del polímero. Este fenómeno se conoce como “dieselización” y resulta en quemaduras en la superficie del plástico debido a la oxidación de los lubricantes.

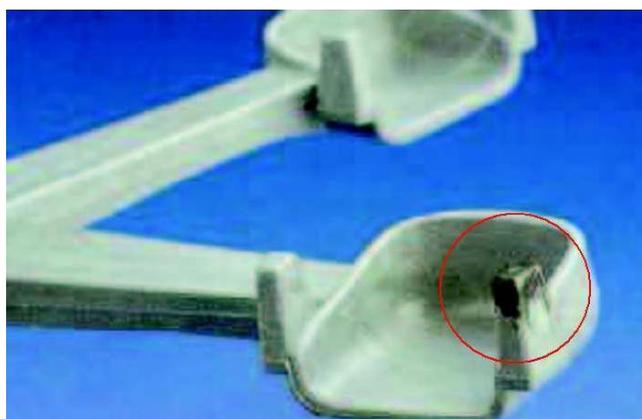


Figura 3.11: Ejemplo de quemaduras.

### 3.6.7. Burbujas de aire.

De igual forma que en las quemaduras, si no se relaja la presión de los atrapamientos de aire, pueden llegar incluso a impedir el llenado de la pieza.

### **3.6.8. Marcas del punto de inyección.**

El flujo laminar del plástico fundido sólo puede ser mantenido si la fricción estática entre la superficie del fluido y la pared de la cavidad permanece constantemente mayor que la fuerza de cizalla ejercida entre las capas del fluido. En este caso la solución es intentar conseguir condiciones más favorables para la creación de una capa suficientemente fuerte para resistir la fuerza de cizalla del flujo, mediante la reducción de la velocidad inicial de inyección. Después puede subirse la velocidad de inyección con el fin de obtener una velocidad de fusión uniforme.



*Figura 3.12: Ejemplo de marcas originadas por el punto de inyección.*

### **3.6.9. Efecto jetting (gusanillo).**

“Jetting” es la formación de un cordón de plástico fundido que entra en la cavidad del molde desde el conducto de colada, en un movimiento incontrolado. El cordón fundido hace un mínimo contacto con la pared de la cavidad, extendiéndose en pliegues durante la fase de llenado que después son rodeados por el plástico fundido que entra a continuación. Este fenómeno crea una falta de homogeneidad, deformaciones, tensiones locales internas, etc.

La causa física del “jetting” se basa en un insuficiente flujo del polímero fundido desarrollado en la cavidad. El flujo ideal no se consigue necesariamente durante la fase de llenado del molde sin las medidas correctas. Esto es particularmente cierto en puntos donde de repente el canal se ensancha. Las dificultades de mantener un flujo correcto se agravan con los cambios bruscos del canal de fusión y con la velocidad del plástico inyectado. Las medidas para prevenir este fenómeno dependen de las causas específicas de este efecto. Cuando un material fundido de alta viscosidad entra en el espacio vacío de la cavidad, la fuerza de cohesión de materia crea una gran resistencia al extenderse. Esta fuerza cohesiva interna puede ser reducida con un incremento de la temperatura.



Figura 3.13: Ejemplo efecto Jetting.

### 3.6.10. Efecto stick-slip (irisados circulares o micro-alas).

Este defecto superficial recuerda las ranuras de un disco. La razón física de este son las vibraciones elásticas del plástico fundido inyectado. Esto se debe en parte a una velocidad demasiado lenta en conjunción con las paredes de la cavidad, relativamente frías.

Estas ranuras en la pieza inyectada también pueden ser producidas por una falta de presión de inyección. Una baja temperatura del plástico fundido y/o la temperatura del molde en combinación con las dos causas mencionadas anteriormente son a menudo las responsables del efecto "Stick-Slip".

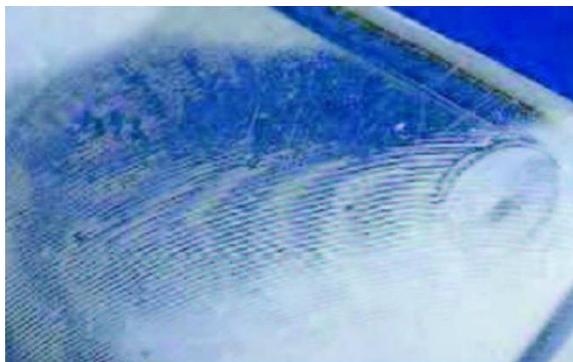


Figura 3.14: Ejemplo stick-slip.

### 3.6.11. Falta de llenado completo de la pieza.

Igual que en fundición, éste se produce en una pieza que ha solidificado antes de llenar completamente la cavidad. El defecto puede corregirse incrementando la temperatura o la presión. El efecto también puede originarse por el uso de una máquina con capacidad de dosificación insuficiente, en cuyo caso se necesita una máquina más grande.

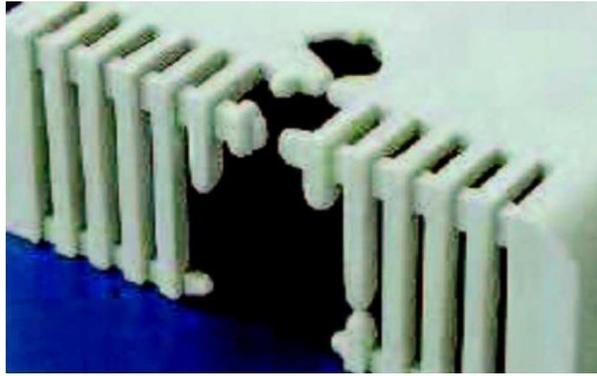


Figura 3.15: Ejemplo de llenado insuficiente.

### 3.6.12. Deformación por expulsión.

Las causas físicas de las deformaciones pueden clasificarse de la siguiente forma:

- Las fuerzas necesarias para el desmolde no pueden aplicarse sin dañar la pieza.
- El movimiento de desmolde es obstaculizado en algún punto.
- La pieza no ha llegado a la temperatura de expulsión en todos los puntos.

El total de la fuerza de desmolde aplicada es algo crucial y debe, por tanto, mantenerse baja. Además de otros factores, la contracción de la pieza ejerce un impacto directo sobre las fuerzas de desmolde. Debe tenerse en consideración que la geometría de la pieza moldeada es un factor muy importante a la hora de producirse deformaciones debidas a las fuerzas que se producen en el desmolde.

En la proximidad a los nervios la contracción actúa de modo que aumenta la fuerza de desmolde por causa de que los nervios han de ser separados de las paredes del molde (disminuya la presión de mantenimiento o aumente el tiempo de enfriamiento).

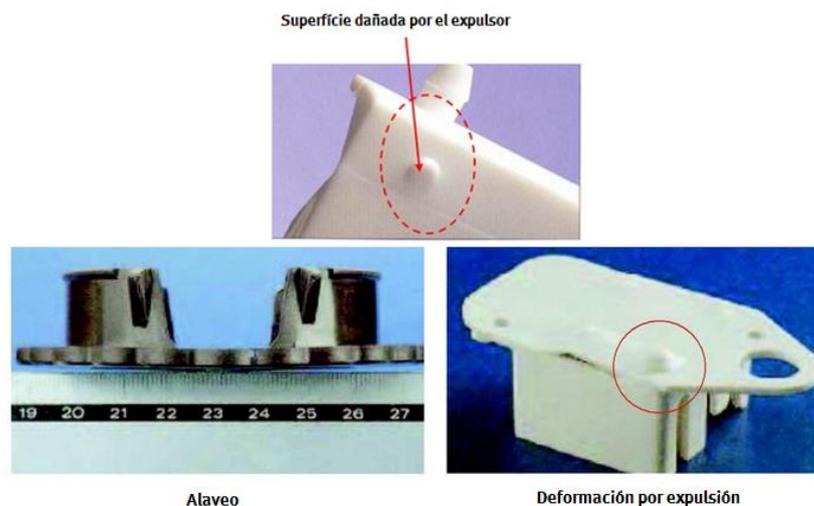


Figura 3.16: Ejemplos de defectos de expulsión.

## 4. Diseño de piezas.

### 4.1. Obtención de medidas.

La gran mayoría de medidas han sido obtenidas por medida directa de otro modelo a escala. Sin embargo, existen cotas que son imposibles de medir utilizando un pie de rey, pues éste no puede acceder a determinados sitios.

Este tipo de medidas han sido obtenidas por medio de planos o blueprints montados sobre SolidWorks.

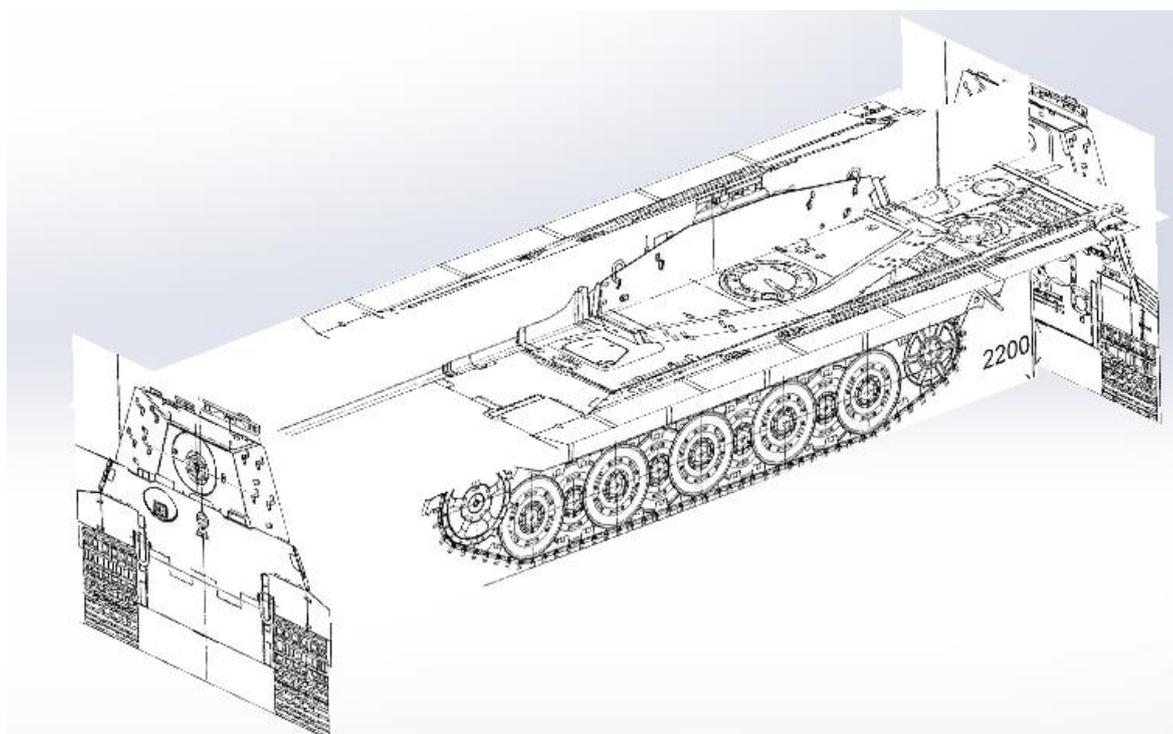


Figura 4.1: Planos montados sobre Solidworks.

De esta forma y conociendo la escala y una medida del tanque, el resto de medidas se pueden aproximar por superposición.

## 4.2. Análisis del ángulo de salida.

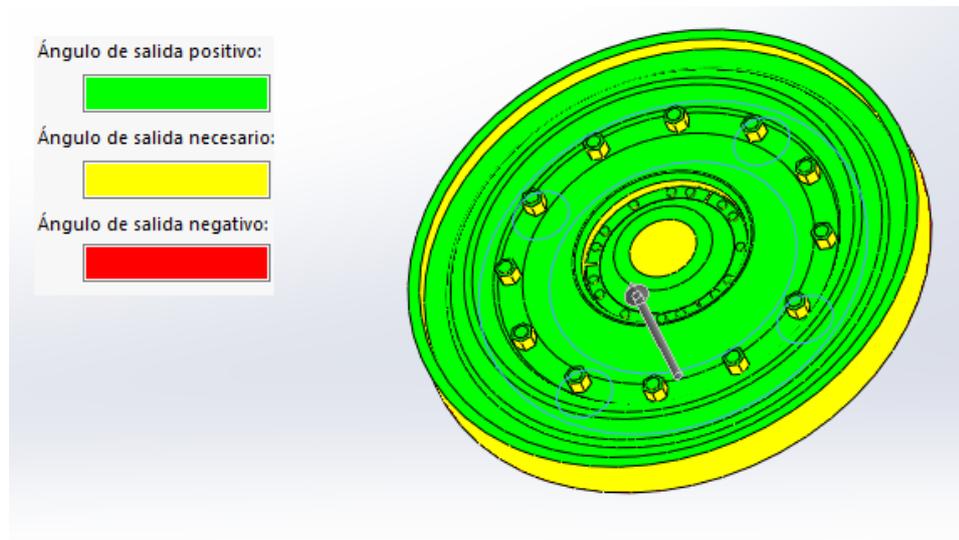


Figura 4.2: Ejemplo de análisis del ángulo de salida.

Durante el diseño de las piezas, hay que prestar especial cuidado a la dirección de desmoldeo de las piezas para que éstas se puedan extraer del molde. En la figura 4.2 podemos ver una pieza apta para su desmoldeo. Pues el ángulo de salida necesario (en amarillo), dan validez a la dirección de desmoldeo, que separa las caras opuestas de la pieza (en rojo y verde).

En la figura 4.3. podemos observar una pieza cuya geometría no permite el desmoldeo en un molde simple de dos piezas.

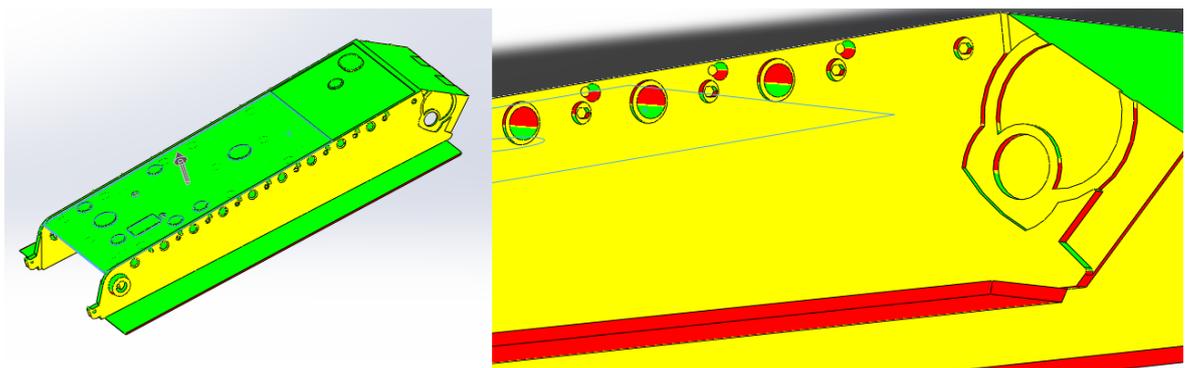


Figura 4.3: Pieza con dirección de desmoldeo inválida.

Tal y como se puede apreciar, la transición de colores en los taladros y marcas laterales de la pieza pasan directamente de verde a rojo y con patrones distintos. Esto quiere decir que la pieza quedaría bloqueada por dichas geometrías y no se podría extraer sin dañar o romper la pieza. Para poder extraer la pieza con facilidad, el molde deberá ser cortado en un mínimo de 3 piezas.

Otro aspecto que hay que vigilar son las caras muertas. En la figura 4.4. se puede apreciar este suceso.

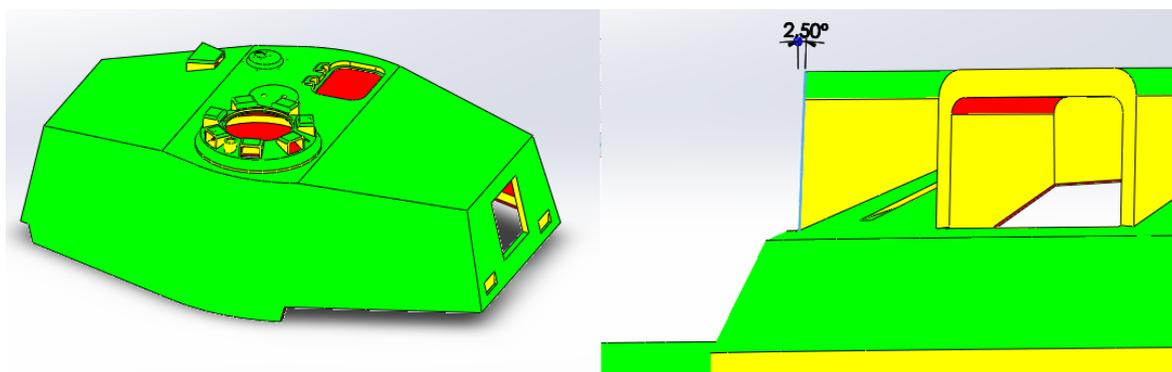


Figura 4.4: Ejemplo de cara muerta corregida.

Si no se le hubiera dado un ángulo de inclinación a dicha superficie, no se podrían realizar los agujeros del observatorio.

### 4.3. Tolerancias.

Se han definido las tolerancias dimensionales bajo norma ISO 2768 1:1989, así como los ajustes del conjunto.

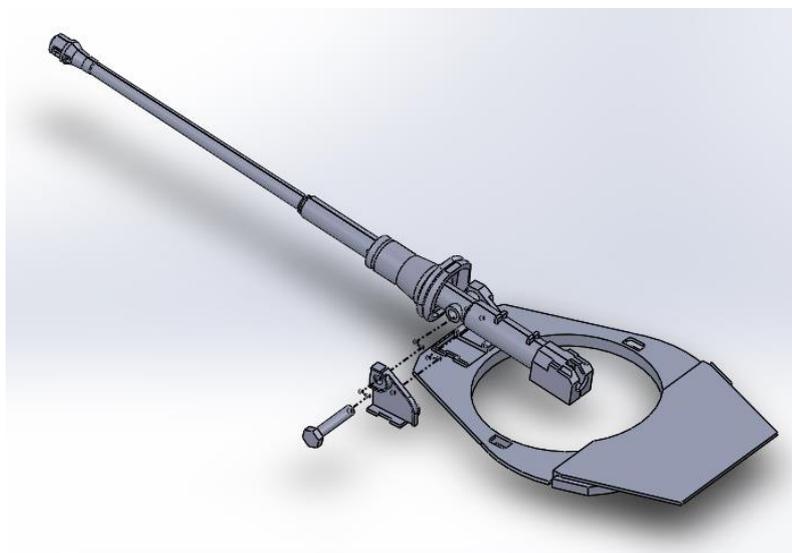


Figura 4.5: Ejemplo de ajuste.

Un ejemplo es el mostrado una figura 4.5, en donde se quería conseguir una relación de apriete ligero entre el pasador y el conjunto del cañón para poder que se pudiera ajustar al gusto y quedase fijo.

Dicho lo cual y según norma, se ha definido un ajuste H7/j6.

#### 4.4. Diseño de matrices.

Una vez determinada la dirección de desmoldeo de todas las piezas se procede a agruparlas en matrices. De este modo, todas aquellas piezas que se puedan obtener de un molde simple de 2 piezas compartirán estructura.

Lo primero que hay que tener en cuenta a la hora de diseñar una matriz son la posición de las piezas dentro de la misma. Aquellas piezas con un volumen mayor deberían estar más próximas al punto de inyección, pues es más fácil llenar una cavidad cuando el flujo está caliente y por tanto menos viscoso.

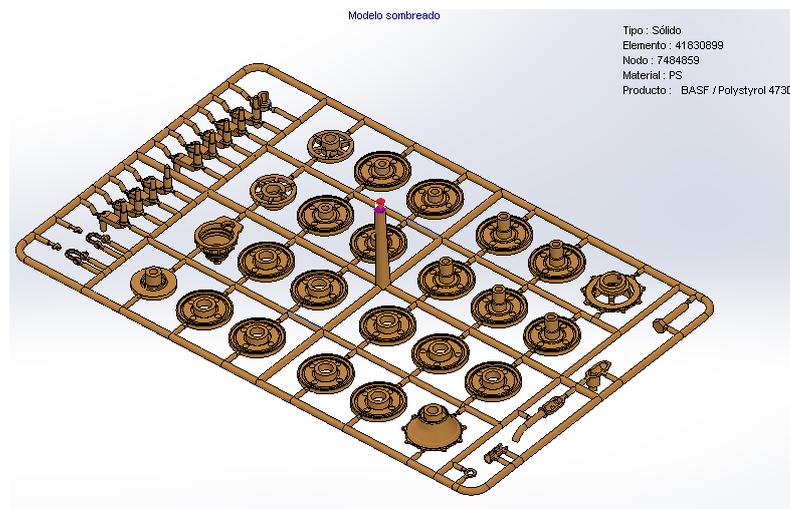


Figura 4.6: Ejemplo de matriz.

Por otra parte, se deben minimizar el número de líneas de soldadura siempre que sea posible, con el fin de evitar defectos en la superficie de la pieza. Cuantas más derivaciones de flujo se produzcan más líneas de soldadura aparecerán.

En el diseño de moldes de inyección, se debe prestar especial atención en el tamaño de las entradas y los canales de colada. La resistencia al flujo durante la etapa de inyección debe ser lo más baja posible. Hacer las puertas demasiado pequeñas, podría causar ralladuras, carbonización debido a la cizalla y delaminación.

La solidificación prematura del material fundido resulta a menudo en marcas y rechupes en la pieza moldeada debido a que la contracción del material durante la fase de compactación no ha podido ser compensada. (BASF, 2001).

Lo ideal sería que todas las cavidades del molde se llenaran de forma simultánea para que no se produjeran variaciones de presión. Existen dos formas de equilibrar una matriz, flujo equilibrado y flujo compensado.

El flujo equilibrado (Figura 4.6.a) presenta los inconvenientes de que se pierde mucho material en los recortes y que el molde debe ser bastante grande.

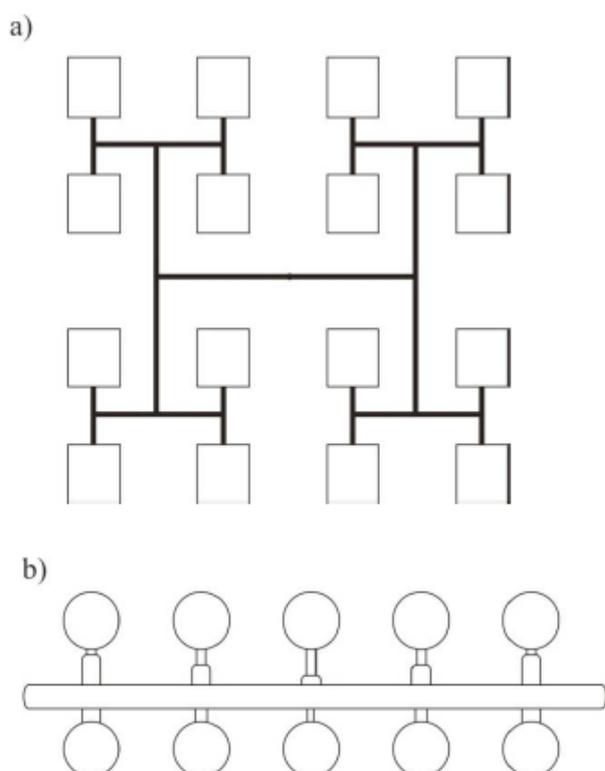
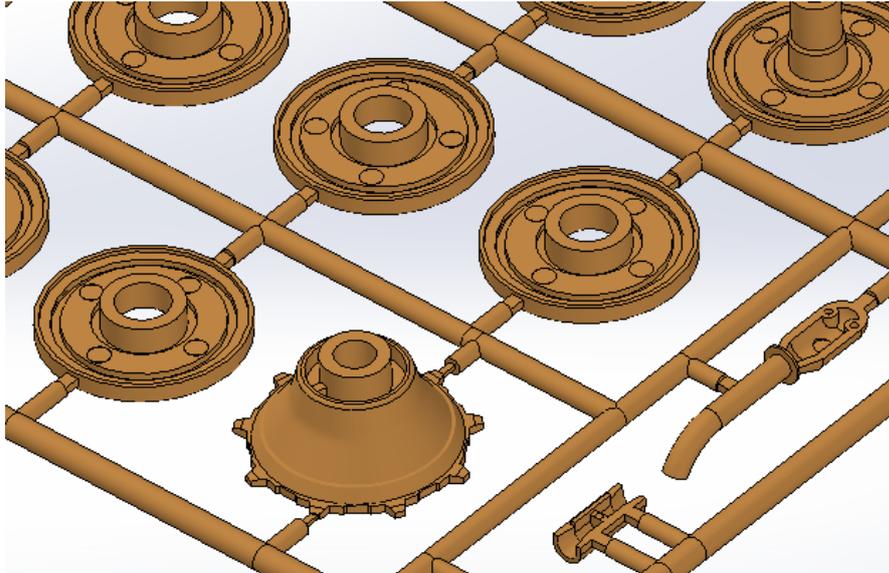


Figura 4.7: Cavidades dispuestas en: a) Flujo equilibrado. b) Flujo compensado. (Fuente: Beltrán y Marcilla).

Modificando el diámetro de los canales de entrada, lo que se conoce como flujo compensado (Figura 4.6.b), se consigue que las cavidades estén lo más juntas posibles y los canales sean lo más cortos posibles. Tratar de hacer esto manualmente resulta una tarea casi imposible en términos de tiempo-beneficio, por lo que se deben recurrir a simetrías siempre que sea posible.

Otro aspecto a tener en cuenta, es la estrangulación del flujo en la entrada de las cavidades. Se realiza comúnmente para facilitar la extracción de la pieza de la matriz y causar un menor impacto en las cualidades estéticas de la misma, pero debe ser lo suficientemente grande para garantizar el correcto llenado de la cavidad.



*Figura 4.8: Detalle de las estrangulaciones.*

Se intuye que las piezas se suministran en matrices al cliente por varios motivos:

- El coste de actividad derivado de extraer cada una de las piezas es mayor que el coste del material recuperado.
- Evita la pérdida de piezas durante su transporte.
- Evita riesgos de asfixia mientras éstas sigan dentro de su matriz.

De todas formas se cortará la mazarota para poder reducir las dimensiones del packaging.

## 5. Diseño de moldes.

### 5.1. Dimensiones.

Las dimensiones del molde tienen que ser dimensiones normalizadas para que quepan en cualquier máquina inyectora. Por ello, se han seleccionado placas normalizadas del catálogo de Hasco Ibérica Normalizados S.L. que se puede consultar en los Anexos.

### 5.2. Grosor de pared.

El grosor de pared necesario viene determinado por la resistencia y rigidez, así como un tiempo de ciclo económico para el componente. Para prevenir o reducir la aparición de marcas y rechupes es recomendado colocar la entrada allí donde se encuentre la región de mayor grosor, pues es donde el mantenimiento de la presión puede actuar por un mayor tiempo.

Si las entradas se colocan en regiones con grosor de pared fino, las contracciones de volumen en regiones más gruesas no van a poder ser compensadas pues las zonas con menor grosor de pared se refrigeran antes. (BASF, 2001).

### 5.3. Ventilación.

Los moldes deben disponer de respiradores. Cuando dos moldes se cierran un volumen de aire queda atrapado en la cavidad del molde. Durante la inyección del polímero, estos gases, si no se eliminan, se comprimirán y sobrecalentarán. Dicha temperatura puede aumentar lo suficiente como para causar la autoignición de los componentes volátiles del polímero (375°C - 425°C, 4-8 MPa). Este fenómeno se conoce como “dieselización” y resulta en quemaduras en la superficie del plástico debido a la oxidación de los lubricantes.

Además de los problemas visuales, la ventilación inapropiada resultará en piezas que no pueden ser llenadas, que tienen problemas de dimensión o peores propiedades físicas y/o eléctricas. La primera cuestión que tiene que ser estudiada es la posición de la abertura. Es importante que todas las aberturas deban conducir hasta la atmósfera o la abertura será inútil. En el apartado X.X, sobre el análisis de llenado, se muestra dónde ocurren las burbujas de gas. Dondequiera que sea posible, las aberturas deberían estar posicionadas en la mitad móvil del molde, sobre la superficie de partición, pues no se podrían mecanizar de otra forma, pues resulta imposible trepanar agujeros con un diámetro tan estrecho.

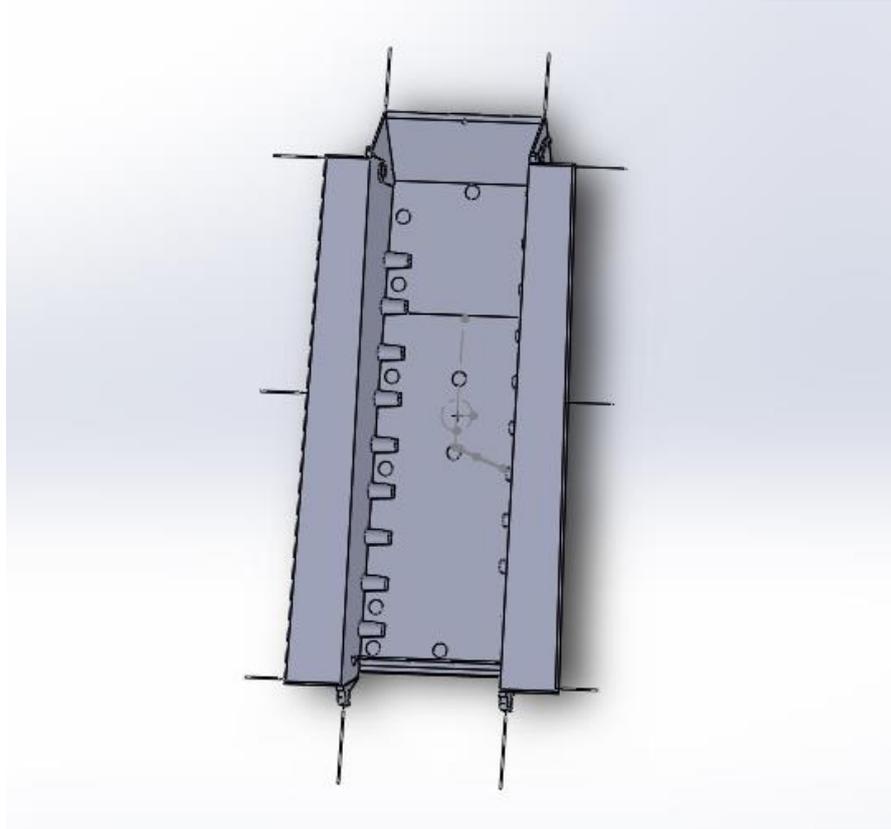


Figura 5.1: respiradores directos sobre pieza.

Se recomienda que los respiradores estén separados entre sí una distancia de 3-4" (76,2-101.6mm) con un diámetro de 0,02mm, el cual permite al aire fluir pero impide la fuga del polímero, y una longitud de 2 a 5mm hasta conectarse con un canal de escape.

Durante la construcción, hay que tener especial cuidado en el diseño de los canales de escape, para que la limpieza de los mismos sea prácticamente innecesaria. De todas formas, los canales deben ser revisados periódicamente y limpiados si fuera necesario para prevenir el deterioro de la eficiencia de ventilación causado por los depósitos de material durante el uso progresivo del molde. (BASF, 2001 y PLENCO, 2009).

### 5.3.1. Ventilación por vacío.

Algunos diseños de piezas son difíciles de ventilar a causa de "bolsas muertas" o por otras razones. También, algunos materiales, como por ejemplo los poliésteres termoendurecidos, son difíciles de ventilar adecuadamente usando los métodos de ventilación convencional. En estas situaciones la ventilación por vacío es una buena opción para considerar.

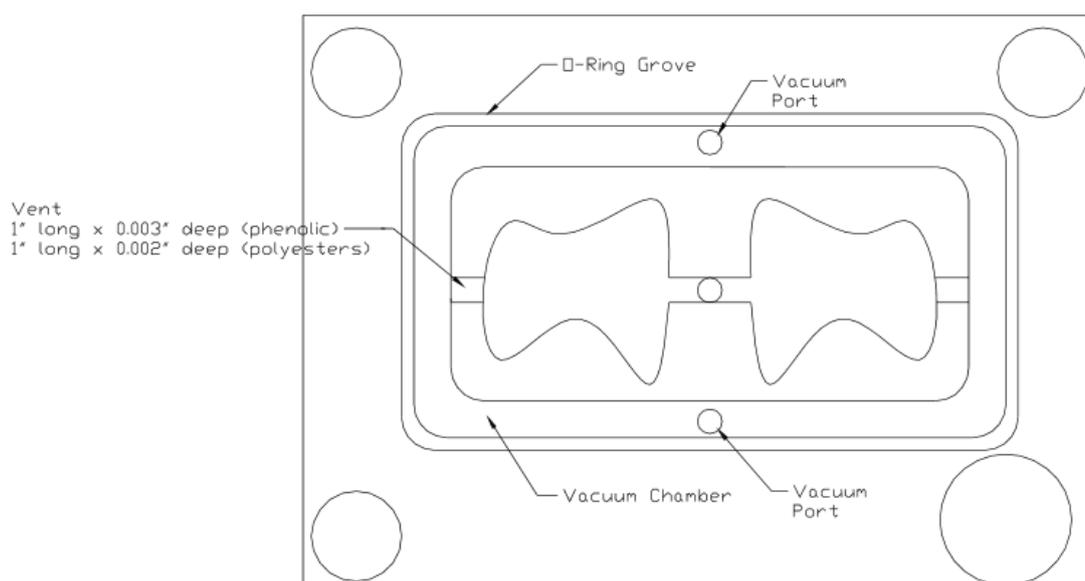


Figura 5.2.: Esquema de un sistema de ventilación con cámara de vacío.

Este método consiste en rodear la cavidad con una cámara de vacío con una junta tórica. Ambas cavidades son conectadas por unos canales de ventilación. Como se aprecia en la figura, los puertos de vacío son colocados tan lejos como sea posible de abertura de los canales, con el fin de no obstruir los puertos de vacío. El segundo puerto es un apoyo en caso de que el puerto principal quede sellado. (PLENCO, 2009).

Desgraciadamente Solidworks no ofrece esta opción, por lo que no se han podido realizar estudios de ventilación con cámara de vacío.

## 5.4. Expulsión.

Para estirenos, el ángulo de salida de los canales de colada es generalmente de  $1^\circ$ , pero en ninguna circunstancia debe ser inferior a  $0,5^\circ$ . (BASF, 2001).

Solidworks Plastics no admite geometrías de canal que no sean cilíndricas, por lo que esta consideración queda excluida de nuestro modelo.

Las espigas de expulsión deberían ser localizadas en los puntos más profundos de la cavidad o núcleo. Se sugiere específicamente que las espigas de expulsión sean localizadas en los puntos más profundos. Si las espigas de expulsión no están localizadas correctamente, la pieza tiene que ser “extraída” de las áreas más profundas del molde. Las piezas que tienen que ser “extraídas” fuera del molde son más probables que se peguen o estén torcidas durante la expulsión.

Una vez que se determina la colocación de las espigas de expulsión, el tamaño de la espiga necesita ser decidido. Las espigas de expulsión con diámetros muy pequeños pueden ser problemáticos a causa de su susceptibilidad de romperse, por lo tanto, no se recomiendan las espigas de expulsión con diámetro más pequeño de 2.4 mm (3/32"). Otro problema común es el material fluye abajo y alrededor la espiga de expulsión y se obstruye de modo que se rompe cuando se accionan los expulsores. Para prevenir que esto se ocurra, un agujero para la espiga debería ser solo 0.025 mm (0.001") más grande que la espiga para una profundidad de 13 – 16 mm (1/2" - 5/8") de la cavidad. Hacerlo más profundo puede hacer que las espigas se doblen y se rompan. (PLENCO, 2009).

Es deseable además que las espigas sean colocadas sobre superficies planas. Cuando esto no sea posible, la superficie de contacto de la espiga deberá ser adaptada al contorno de la cavidad.

Los expulsores deben ser diseñados con un área de acción lo suficientemente grande como para que la pieza no se deforme durante la expulsión dado que el módulo de elasticidad se vuelve más sensible al aumentar la temperatura y lo hace más propenso a deformaciones.

Esto también permitiría una expulsión más rápida, recortando el tiempo del ciclo. (BASF,2001).

## 6. Selección de materiales.

### 6.1. Materia prima.

Para decidir el material con el que fabricar nuestro modelo, se ha buscado consejo entre los empleados de la empresa Avatars of War (AoW), los cuales fabrican miniaturas de fantasía medieval en varios materiales.

Inicialmente sugirieron utilizar los materiales que ellos utilizan para hacer sus miniaturas. Qué son plástico ABS o PVC. Dependiendo del nivel de detalle requerido por la propia miniatura.



*Figura 6.1: Piezas de Lego fabricadas en plástico ABS.*

El plástico ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) es un termoplástico de uso común. Es un material amorfo y por consiguiente no tiene un punto de fusión auténtico. Tiene una buena resistencia al impacto y goza de una buena tenacidad incluso a bajas temperatura (-40°C). Además, es duro, rígido, fácil de mecanizar y resistente a ácidos acuosos, alcalinos, ácido clorhídrico y fosfórico, alcohol y aceites minerales y vegetales. Se hinchan con ácido acético y tetracloruro de carbono y son atacados por los ácidos nítrico y sulfúrico. Son solubles en esteros, cetonas, dicloruro de etileno y acetona. Admite pigmentos, pues la materia prima es translúcida blanquecina sus propiedades no se ven gravemente afectadas por la humedad. Es inflamable cuando se expone a altas temperaturas y puede ser dañado por la luz solar.

Su rango de aplicaciones va desde juguetería hasta piezas de automoción, pasando por carcasa para componentes electrónicos e instrumentos musicales.

El plástico PVC (Polyvinyl chloride) es el tercer polímero más producido del planeta, detrás del polietileno y el polipropileno. Se presenta en dos formas básicas: rígido y flexible.

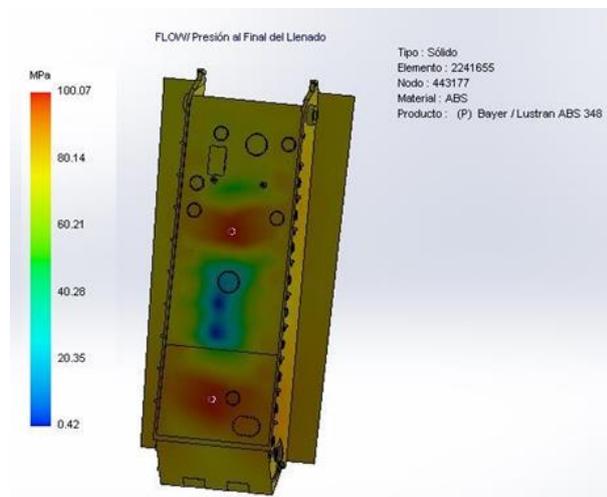
Su forma rígida se usa generalmente en la construcción de tuberías, perfiles de ventanas, botellas y tarjetas de crédito. En su forma flexible se sigue utilizando en fontanería, aislamiento de cables, cuero sintético, hinchables y otras varias aplicaciones donde sustituye a la goma común.

El PVC puro es un sólido blanco y frágil, insoluble en alcohol pero medianamente soluble en tetrahidrofurano. Tiene una alta dureza (para tratarse de un polímero) y módulo elástico. Su estabilidad térmica es muy pobre, pero es un buen aislante eléctrico. Puede ser dañado por la acetona.

Según los responsables de AoW, el coste de materia prima es mayor en el PVC que en el ABS. Pero producir un molde para PVC es más barato que uno de ABS. Por ello siempre producen en PVC, a menos que el nivel de detalle sea muy fino (pues el ABS se amolda mejor) o tengan una previsión de ventas elevada.

Sin embargo, tras varios estudios se han acabado desestimando ambos materiales.

Se han intentado diversas combinaciones con el ABS. (1 inyector, 2 inyectores, con bebedero, directo a pieza, diferentes fabricantes, etc.) Las principales razones para su desestimación han sido una presión de inyección demasiado próxima a la presión máxima ofrecida por la inyectora (por encima del 66% y en algunos casos del 90%) y crear vórtices que provocan grandes caídas de presión durante la etapa de inyección. (Figura 6.2).



*Figura 6.2: Ejemplo de simulación con ABS con dos inyectores y entrada directa.*

Con lo aprendido con los estudios de ABS, se realizaron dos únicos estudios de PVC. Se seleccionó el producto con la menor viscosidad y se realizó un primer estudio con los parámetros recomendados por el fabricante. El material solidificaba antes siquiera de poder llenar toda la cavidad.

En el ensayo posterior se aumentó la temperatura al máximo permitido sin que se produzca destrucción del material. Sin embargo, la presión de inyección superaba a la presión máxima permitida por la inyectora (Figura 6.3). Los resultados demostraron ser más nefastos que con las simulaciones de ABS.

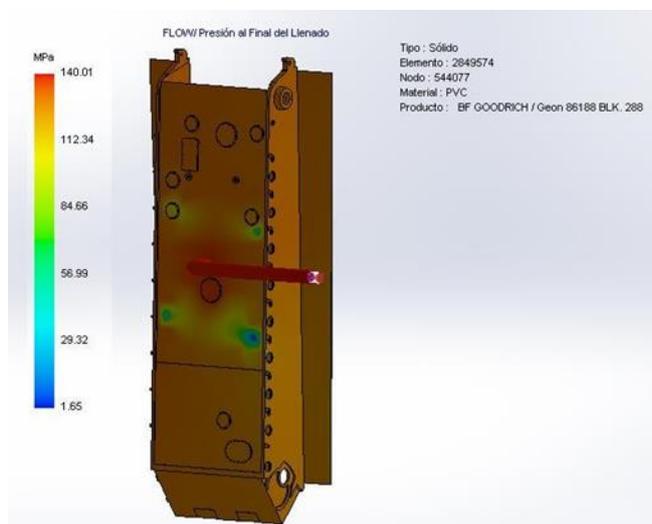


Figura 6.3: Detalle de simulación con PVC con un punto de inyección y colada en derivación.

El principal problema radica en que ambos materiales parecían tener problemas de fluencia en cavidades con superficies elevadas y grosor de pared muy estrecho.

Se consultó en foros y se encontraron diversas menciones al poliestireno como material para productos de modelismo. De hecho, se decía que normalmente el fabricante a menudo especificaba el material en la propia matriz del modelo a escala. Comprobando el modelo disponible de la competencia, se pudo demostrar que esta afirmación es cierta. (Figura 6.4).

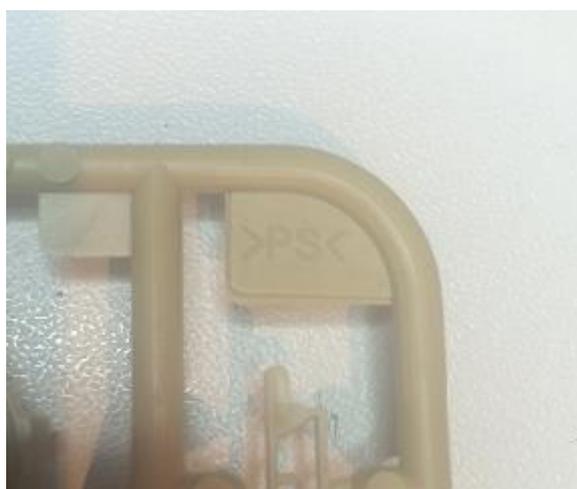


Figura 6.4: Detalle de especificación del material.

PS son las siglas para Poliestireno.

El primer análisis con el producto de menor viscosidad resultó ser más satisfactorio que cualquier producto estudiado hasta la fecha.

El poliestireno para uso general (GPPS) es transparente e incoloro. Es duro, rígido y tiene buenas propiedades dieléctricas.

Dada su estructura amorfa, presenta una elevada estabilidad dimensional y baja contracción del material. Absorbe muy poca humedad y es fácil de moldear, soldar y pintar.

Pero el material es que nos interesa estudiar es una variante del poliestireno más comúnmente conocido como poliestireno de alto impacto.

El poliestireno resistente al impacto (HIPS) se obtiene de polimerizar estireno en presencia de goma de polibutadieno, un elastómero el cual confiere al polímero su resistencia al impacto.

Durante el proceso de polimerización, la rigidez y resistencia al impacto se determina por la cantidad de polibutadieno presente. El HIPS es naturalmente opaco y su apariencia superficial puede variar entre mate y brillante.

(Whelan y Goff, 1990) adjuntan en su libro toda una serie de marcas comerciales para HIPS y la referencia del producto. (Figura 6.5).

<b>4 Some UK Suppliers</b>	<b>5 Trade Names or Trade Marks</b>
Atochem	Lacqrene
Bamberger Polymers	Bapolan
B.A.S.F.	Polystyrol
CdF. Chemie	Gedex
Dow	Styron
Huls	Vestyron
Huntsman	Huntsman
Monsanto	Lustrex
Montedipe	Edistir
Montedison	Edistir
Neste	Neste PS
Shell	Carinex
Sterling	Sternite

Figura 6.5: Marcas comerciales para HIPS. (Fuente: Whelan y Goff).

El producto con menor viscosidad disponible en SolidWorks es Lacqrene de Atochem Polymers. Los resultados (tras 6 estudios) pese a ser mejores, no eran completamente satisfactorios. (Figura 6.6). Además, no hay una única variante de Lacqrene y SolidWorks no especifica a cuál pertenecen los datos

disponibles. Por lo que estimar el coste iba a ser una ardua tarea, así que se decidió probar con otro fabricante.

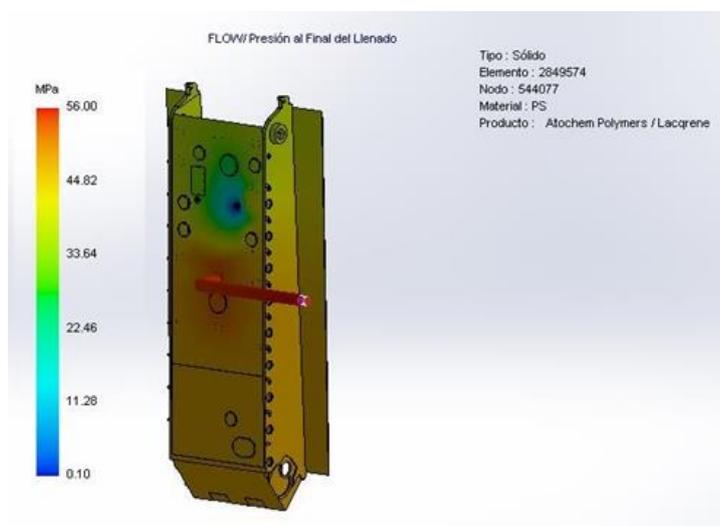


Figura 6.6: Ejemplo de simulación con Lacqrene PS con un punto de inyección y colada en derivación.

En el mismo libro de (Whelan y Goff, 1990) se especificaban varios tipos de Polystyrol (BASF) clasificados por resistencia al flujo. Sin embargo, al tratarse de un libro de 1990 muchas de las terminaciones estaban desactualizadas respecto al catálogo de SolidWorks 2016, y precisamente los que ofrecían una menor resistencia padecían este problema.

Gracias a la amplia base de datos de Matweb apareció una coincidencia entre el catálogo de Solidworks y la base de datos de la web para el **Polystyrol 473 D**.

En Matweb se describe al **Polystyrol 473D** como un material con un alto grado de resistencia al impacto, fácil fluencia y fácil de deformar elásticamente. Propiedades clave para un modelo a escala.

En la tabla 6.1. se pueden apreciar los datos ofrecidos por Matweb.

Physical Properties	Metric
Density	1.05 g/cc
Water Absorption	0.10 %
Moisture Absorption at Equilibrium	0.10 %
Linear Mold Shrinkage, Flow	0.0055 cm/cm
Melt Flow	12 g/10 min @Load 5.00 kg, Temperature 200 °C

Mechanical Properties	Metric
Tensile Strength, Yield	19.0 MPa
Elongation at Break	35 %
Elongation at Yield	1.2 %
Tensile Modulus	1.70 GPa
Charpy Impact Unnotched	NB
 Charpy Impact Unnotched	14.0 J/cm <sup>2</sup> @Temperature -30.0 °C
Charpy Impact, Notched	1.30 J/cm <sup>2</sup>

Electrical Properties	Metric
Electrical Resistivity	>= 1.00e+15 ohm-cm
Surface Resistance	1.00e+13 ohm
Dielectric Constant 	2.5 @Frequency 100 Hz
	2.5 @Frequency 1e+6 Hz
Dissipation Factor 	0.00020 @Frequency 100 Hz
	0.00040 @Frequency 1e+6 Hz
Comparative Tracking Index	425 V

Thermal Properties	Metric
CTE, linear, Parallel to Flow	100 µm/m-°C @Temperature 20.0 °C
Deflection Temperature at 0.46 MPa (66 psi)	73.0 °C
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	67.0 °C
Vicat Softening Point	80.0 °C
Flammability, UL94	HB @Thickness 3.18 mm
Oxygen Index	18 %

Tabla 6.1: Propiedades Polystyrol 473D. (Fuente:Matweb).

## 6.2. Molde.

La selección del material con el que fabricar el molde está sometida a diversos factores. Esto incluye la cantidad de piezas a producir, su tamaño y forma, durabilidad, coste y fuerza requerida. Dependiendo del sistema de entrada y el grosor de pared de la pieza se pueden generar presiones muy elevadas durante el proceso de llenado. Estas presiones pueden dañar o agrietar el molde si no se diseña correctamente.

Para prototipado, donde se produce un número reducido de piezas, se suelen utilizar aleaciones de plomo/zinc. Estos materiales no son muy costosos, requiere un bajo coste de mecanizado, y se puede fundir para reutilizarlo de nuevo.

Esta familia de materiales no es muy duradera porque la estructura plomo/zinc carece de alta dureza, resistencia y durabilidad frente a la erosión. Estos materiales tienen mayores rangos de conductividad térmica que los aceros, lo cual podría afectar a las propiedades finales de la pieza. Este aspecto se vuelve especialmente crítico cuando nos referimos a materiales termoplásticos donde el tiempo de enfriamiento afecta especialmente a la estabilidad dimensional de la pieza moldeada. El Aluminio y el cobre conducen el doble de calor que el acero y 4 veces más que un molde de acero inoxidable. Es también importante remarcar que las propiedades físicas de esta familia de materiales, tales como resistencia primaria o dureza superficial, empeoran con temperaturas superiores a los 80°C.

Mientras que hay una gran variedad de materiales que pueden y han sido utilizados para la fabricación de moldes de inyección, incluyendo aleaciones de aluminio, bronce y acero inoxidable, el material más común para la fabricación de termoplásticos es el acero P-20. (BASF, 2001).

El P-20 es escogido por su innata resistencia combinada con su dureza superficial que puede ser mejorada con tratamientos térmicos. El P-20 puede ser mecanizado utilizando métodos estandarizados. Por ello será el material escogido para nuestro modelo.

Para más información sobre el Acero P-20 se puede consultar en los anexos la ficha técnica del catálogo de Aceros Metapol, S.A.

## **7. Análisis del modelo.**

Antes de comenzar con este capítulo me gustaría enumerar algunas de las limitaciones de la herramienta de software utilizada para la validación de este modelo. Solidworks Plastics permite realizar estudios plásticos, pero no dispone de herramientas para su optimización. A pesar de ofrecer algunos consejos, cualquier intento de mejorar el proceso debe ser realizado manualmente. Esto eleva las iteraciones con diferentes materiales, diferentes puntos de inyección, tiempos de inyección, temperaturas, etc. El tiempo de cálculo de un solo proceso ronda los 90 min. Y para este trabajo se han realizado unas 25 simulaciones para determinar el material e intentar optimizar los parámetros del proceso.

En operaciones multicavidad con un elevado número de piezas, Solidworks Plastics tiene muchas dificultades para asociar superficies de contacto entre pieza y canales de colada. Se invirtieron más de 40h en intentar solucionarlo sin éxito. Por ello, el estudio multicavidad que se describe más adelante se ha tenido que simplificar en gran medida para permitir el cálculo.

### **7.1. Operaciones Previas.**

#### **7.1.1. Control de la humedad en la granza y secado del material.**

Para obtener una pieza con unas buenas propiedades físicas y calidad superficial, es necesario que la humedad de los gránulos no exceda un determinado valor. El nivel de la humedad en los contenedores aumenta como función de las condiciones ambientales del almacén. Sobre todo en los meses de invierno cuando el material es transferido de un ambiente frío y húmedo a uno caliente, donde se puede producir condensación en el momento de abrir el recipiente.

La condensación se puede prevenir trayendo el material a un almacén intermedio a una temperatura adecuada para su secado. Para garantizar la producción de componentes sin defectos, los gránulos deben ser secados durante un periodo de tiempo que depende del tipo de polímero. Secadores de aire circulante suelen ser suficientes para remover la humedad de los gránulos. Pero dado que el aire seco absorbe una mayor cantidad de humedad, los secadores de aire seco suelen ser más efectivos.

En la tabla 7.1. se muestran una serie de tiempos, temperaturas de secado y máxima humedad admitida.

	Drying time (h)	Drying temperature (°C)	Max. permissible moisture content of granules (%)
Circulating air drier			
Polystyrene*			
Luran			
Terluran			
Luran S	2-4	70-80	<0.1
Styrolux	2-4	60	<0.1
Luran S/C	2-4	100-110	<0.1
Terlux	2-4	70	<0.1

\* Normally not required

Tabla 7.1: Procesado de copolímeros de estireno. (Fuente: BASF).

Afortunadamente tal y como se puede observar el Poliestireno no requiere de una etapa de secado previo.

## 7.2. Etapa de inyección.

### 7.2.1. Parámetros de la etapa de inyección.

#### Temperatura de inyección.

Es la temperatura a la que se calienta el material para introducirlo en el interior del molde. La temperatura del material aumenta gradualmente desde que entra por la tolva hasta que se encuentra preparado para ser inyectado. Esta temperatura es función del tipo de material, y no debe ser superior a la temperatura a la que empieza a descomponerse, pero debe ser suficientemente elevada para permitir que el material fluya correctamente. (Beltrán y Marcilla, 2012).

Aparte de algunas excepciones, los polímeros y copolímeros a base de estireno pueden ser procesados en un ancho rango de temperaturas.

La figura 7.1 muestra un resumen de las temperaturas de proceso admitidos para producir diversos derivados del estireno.

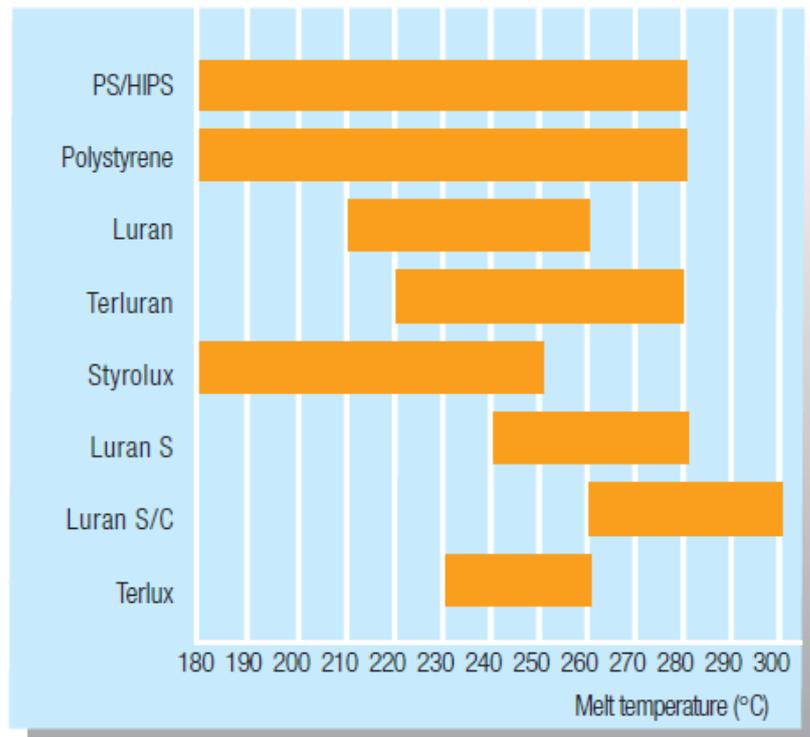


Figura 7.1: Temperaturas de proceso para copolímeros de estireno. (Fuente: BASF).

Si es posible, es preferible trabajar en la temperatura media del rango para proteger el material. Si se decide procesar a temperaturas superiores a la media, se debería reducir el tiempo de estancia del material dentro de la inyectora para impedir que el material se amarillete o se dañe de cualquier otra forma. Además la temperatura del proceso no se debería aproximar en más de 10°C al límite del rango del material por si acaso se producen incrementos de temperatura durante la inyección del material. (BASF, 2001).

#### Temperatura del molde.

La temperatura de la superficie del molde se encuentra entre los más importantes durante la etapa de llenado. Debe ser lo suficientemente baja para enfriar el material fundido y conseguir que solidifique. Esta temperatura varía a lo largo del molde y depende de varios parámetros (temperatura del líquido refrigerante, temperatura del material, características térmicas del molde, etc.), pero a efectos prácticos se evalúa como el valor medio a lo largo de toda la cavidad. (Beltrán y Marcilla, 2012).

Aparte de afectar a la calidad superficial, la temperatura del molde también afecta a las propiedades mecánicas de la pieza moldeada, a la resistencia de las líneas de soldadura cuando dos flujos se encuentran y a las tolerancias dimensionales de la misma. Un gradiente de temperaturas entre diferentes puntos del molde resultará en diferentes tiempos de refrigeración que derivarán en diferencias en el empaquetado y deformaciones. (Figura 7.2).

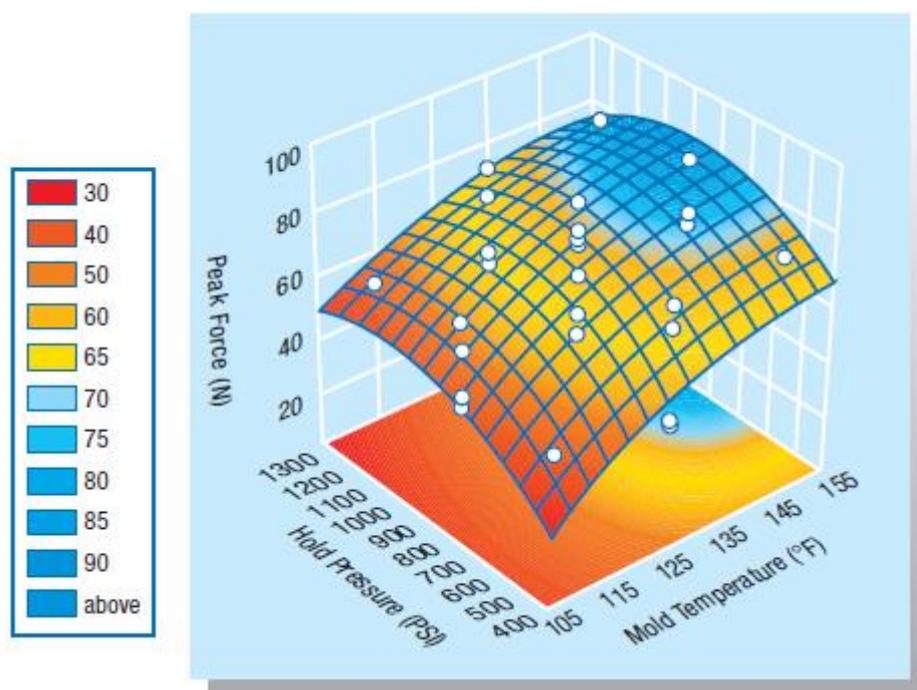


Figura 7.2: Impacto instrumental del poliestireno de alto impacto frente a la presión de mantenimiento y la temperatura del molde. (Fuente: BASF).

En general, una mayor temperatura del molde, desemboca en un tiempo de refrigeración más taimado. La contracción de la pieza puede ser compensada con tiempos de refrigeración más largos resultando en menores tensiones residuales.

#### Velocidad del tornillo.

Las revoluciones del husillo de la inyectora pueden ser configuradas de tal manera que se pueda exprimir el tiempo del ciclo de plastificación hasta su máxima extensión. En la figura 7.3. se pueden apreciar la velocidad de giro del tornillo recomendada en función de su diámetro.

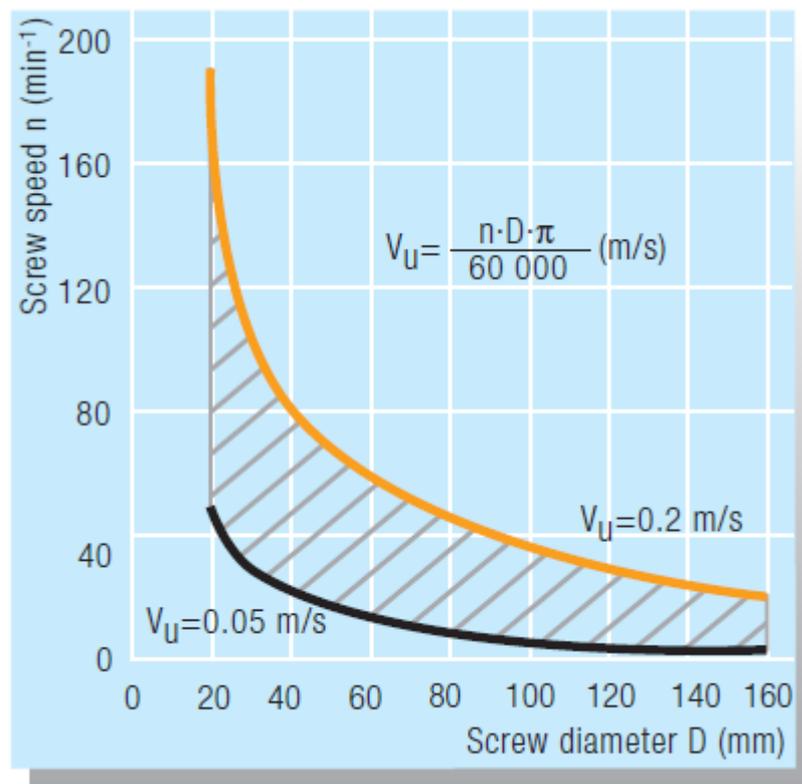


Figura 7.3: Velocidad de giro recomendada del husillo como función del diámetro y velocidad lineal. (Fuente: BASF).

### Refrigeración.

Tan pronto como se determina la posición de la pieza dentro del molde, se debería tener en consideración el control uniforme de la temperatura de la pieza moldeada. La temperatura efectiva del molde tiene un efecto sustancial sobre el tiempo de ciclo, acabado superficial (brillo, líneas de soldadura, etc.), contracción y deformación en la superficie de la cavidad.

La refrigeración del molde se consigue instalando canales de refrigeración en los platos base, por los cuales circula agua o una solución de etilenglicol. El diámetro del canal, ubicación, así como su capacidad de flujo, determinarán su efectividad para refrigerar. El diámetro de dichos canales oscila entre 0,25-0,375". Las tuberías interconectadas, deberán tener el mismo diámetro interior para garantizar que el flujo a través del sistema mantiene un régimen turbulento. El flujo turbulento consigue extraer de 3 a 5 veces más calor que un flujo laminar.

A menudo, segmentos de la superficie del molde requerirán que su temperatura sea regulada por circuitos de refrigeración diferentes. Un enfriamiento uniforme, acompañado de un gradiente no superior a  $12^\circ\text{C}$  en todo el molde, proveerán de piezas correctamente uniformes. (BASF, 2001).

### Presión de inyección.

La presión de inyección es la cual se aplica inicialmente al material fundido y que se desarrolla como consecuencia del movimiento hacia adelante del tornillo. Esta presión obliga a que el material fundido fluya hacia adelante, produciendo el llenado inicial del molde. En una situación ideal la presión inicial debe ser lo mayor posible, de modo que el llenado se produzca lo más rápidamente posible. (Beltrán y Marcilla, 2012).

La presión máxima es la presión máxima que puede ofrecer la inyectora. Para garantizar unas buenas condiciones de inyección la presión de inyección no debería ser superior a 2/3 de la presión máxima permitida por la inyectora. Hoy en día la gran mayoría de las máquinas del mercado tienen una presión máxima de inyección de 140 MPa. Presiones superiores se consideran inyectoras de alta presión, son más caras y por lo tanto las intentaremos evitar.

Para prevenir que la velocidad de inyección caiga por debajo del límite deseado, se debe definir una elevada presión de inyección. Una caída en la tasa de inyección es indicativa de una presión de inyección demasiado baja o que la velocidad objetivo es demasiado alta.

Diferencias en el grosor de pared mientras la velocidad de inyección permanece constante resultan en un no uniforme llenado del molde y por consiguiente en marcas de flujo. Especialmente en los casos con grosores de pared muy finos, se debe escoger una elevada presión de inyección. Como regla general, una alta presión de inyección deriva en una elevada temperatura de inyección y brillo superficial.

Elevadas presiones de inyección favorecen una solidificación más uniforme. En muchos casos, las líneas de soldadura son menos visibles y la resistencia al impacto se ve favorecida.

A velocidades de inyección más elevadas, la presión requerida aumenta y la demanda del sistema de ventilación se vuelve más exigente. Para un flujo relativamente frío, existe el riesgo de dañar el material o de que aumente la cizalla en el molde. (BASF, 2001).

### Punto de inyección o tobera.

La tobera es la pieza situada en el extremo del cilindro de inyección y que da salida al material fundido hacia los canales del molde. El diseño de la tobera depende mucho del tipo del polímero con el que se trabaje, y el diámetro suele oscilar entre 3 y 8 mm dependiendo del peso de la pieza inyectada. La tobera debe poder intercambiarse con facilidad, para poder utilizar la más adecuada dependiendo del tipo de polímero y de las piezas moldeadas. Debe además mantener correctamente la temperatura del polímero, y evitar el goteo de material que impediría el buen asiento ente tobera y bebedero.

Como se puede apreciar en la figura 7.4. el diámetro del taladro de la tobera debe ser siempre 1 o 2 mm menor que el del bebedero para evitar retenciones del material (casos a y b). Si se usa una tobera redonda la curvatura de la punta debe ser menor que la del asiento sobre el molde, pues en caso



contrario se produciría la salida del polímero fundido y no sería posible conseguir un buen asiento entre tobera y bebedero (caso c). (Beltrán y Marcilla, 2012).

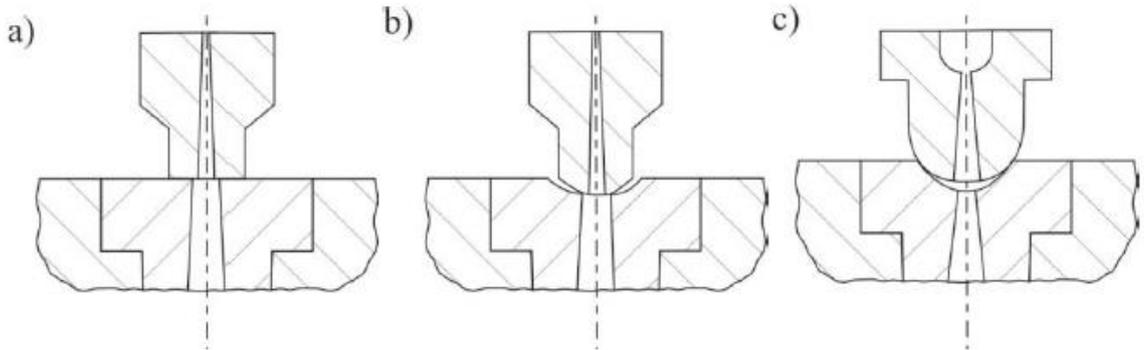


Figura 7.4: Diseños de toberas y bebederos. (Fuente: Beltrán y Marcilla).

### 7.2.2. Resultados de flujo.

En este apartado, y en los subsiguientes apartados de resultados seguiremos el camino de una matriz y una pieza (que por su geometría no podía ir incluida dentro de una matriz) a lo largo de las diferentes etapas del proceso.

Propiedades	
Nombre de material	<b>PS</b>
Nombre del producto	<b>BASF / Polystyrol 473D</b>
Temperatura del material	<b>230.00 °C</b>
Temperatura del molde	<b>60.00 °C</b>
Temperatura de eyección	<b>120.00 °C</b>
Temperatura de transición cristalina	<b>100.00 °C</b>
Calor específico	<b>2.010000e+007 erg/(g-C)</b>

Conductividad	<b>8.000000e+003 erg/(sec-cm-K)</b>
Módulo de elasticidad	<b>3.000000e+010 dyne/cm<sup>2</sup></b>
Coefficiente de Poisson	<b>3.800000e-001</b>

Tabla 7.1: Datos recomendados del material.

### Descripción general Pieza.

Por lo que se refiere al mallado de la pieza, se ha escogido un mallado superficial triangular ( $L=0.5\text{mm}$ ), acompañado de un mallado sólido híbrido, esto quiere decir que el mallado dispone de una capa límite mientras que el interior está conformado por tetraedros. (Figura 7.5.)

Se ha definido un refinamiento local con tolerancia de  $0,1\text{mm}$  pues es el menor orden de magnitud de las cotas de la pieza.

En rojo, se muestran los canales de colada, mientras que en azul se muestran los canales de refrigeración.

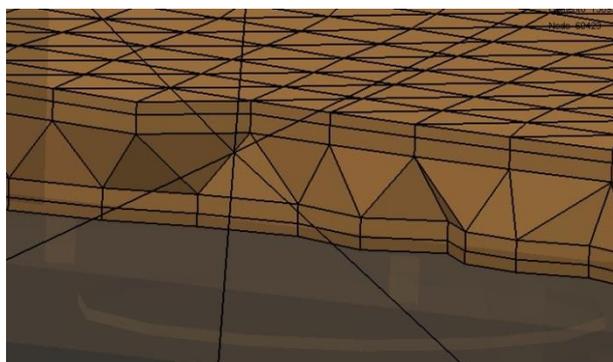
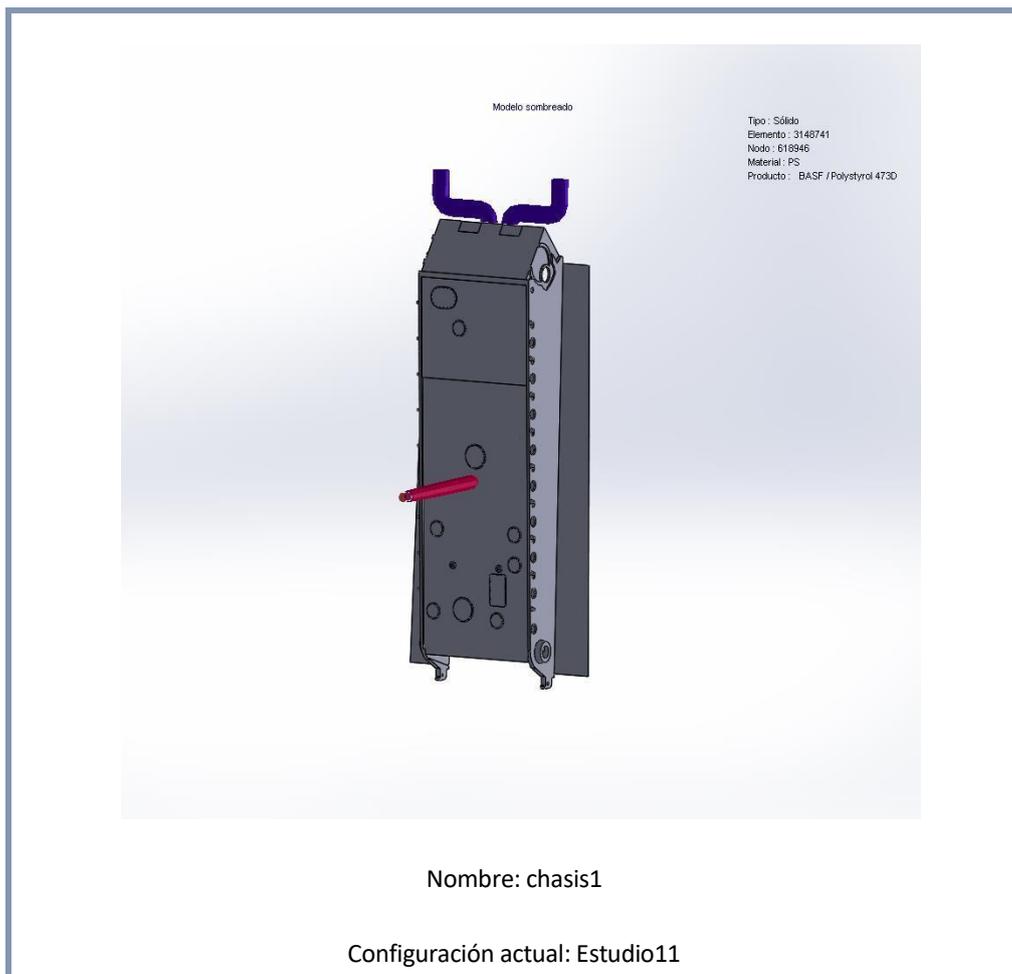


Figura 7.5: Detalle del mallado sólido.



<b>Nombre</b>	Estudio14
<b>Tipo</b>	Sólido
<b>Elemento</b>	3148741
<b>Nodo</b>	618946
<b>Cara de simetría</b>	No
<b>Volumen</b>	30.00 (cm <sup>3</sup> )
<b>Peso</b>	29.31 (G)
<b>Dimensiones</b>	90.00 (mm) x 78.84 (mm) x 189.70 (mm)

Tabla 7.2: Descripción general. Pieza.

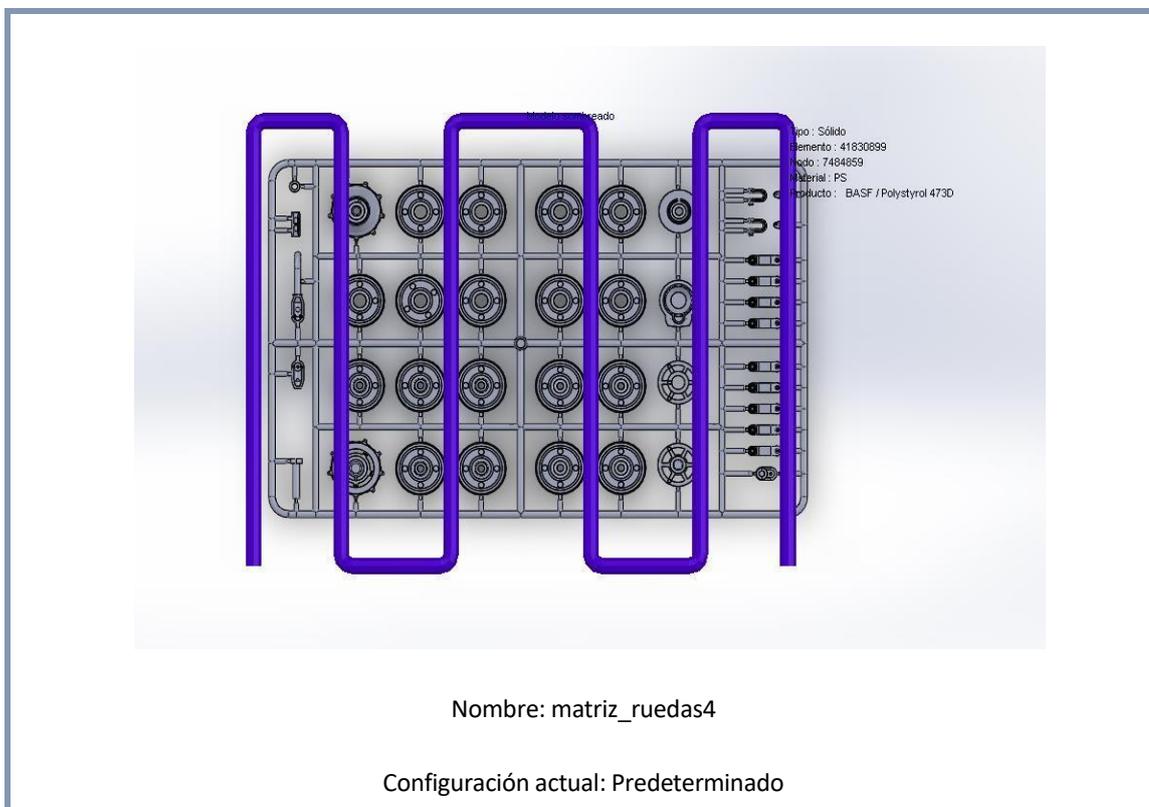
<b>Tiempo de llenado</b>	1.05 sec
<b>Temperatura Fusión Material Principal</b>	240 °C
<b>Temperatura pared molde</b>	60 °C
<b>Presión máxima de inyección</b>	140 MPa
<b>Flujo de inyección máximo (máquina)</b>	194 cc/s
<b>Dirección de la gravedad</b>	-Z

Tabla 7.3: Ajustes de llenado. Pieza.

<b>Fuerza de Cierre X-dir.</b>	17.6598 Tonne (19.5000 Ton U.S)
<b>Fuerza de Cierre Y-dir.</b>	28.3780 Tonne (31.3000 Ton U.S)
<b>Fuerza de Cierre Z-dir.</b>	5.2295 Tonne (5.7600 Ton U.S)
<b>Presión de inyección Requerida</b>	56.4387 MPa (8190.0000 psi)
<b>Temperatura real máxima</b>	245.3712 °C (474.0000 °F)
<b>Temperatura ponderada máxima</b>	245.4531 °C (474.0000 °F)
<b>Tensiones de Cizalla Máx</b>	0.2072 MPa (30.1000 psi)
<b>Tasa de Cizalla Máx</b>	35597.9100 1/sec
<b>Tiempo de cálculo</b>	2969.91 sec (50 min)
<b>Tiempo de ciclo:</b>	15.37 sec

Tabla 7.4: Resumen de resultados de flujo. Pieza.

Descripción general matriz.



<b>Nombre</b>	Estudio1
<b>Tipo</b>	Sólido
<b>Elemento</b>	41830899
<b>Nodo</b>	7484859
<b>Cara de simetría</b>	No
<b>Volumen</b>	28.29 (cm3)
<b>Peso</b>	27.64 (G)
<b>Dimensiones</b>	245.60 (mm) x 54.50 (mm) x 153.00 (mm)

Tabla 7.5: Descripción general. Matriz.

<b>Tiempo de llenado</b>	0.74 sec
<b>Temperatura Fusión Material Principal</b>	260 °C
<b>Temperatura pared molde</b>	60 °C
<b>Presión máxima de inyección</b>	140 MPa
<b>Flujo de inyección máximo (máquina)</b>	194 cc/s
<b>Dirección de la gravedad</b>	-Z

Tabla 7.6: Ajustes de llenado. Matriz.

<b>Fuerza de Cierre X-dir.</b>	20.8656 Tonne (23.0000 Ton U.S)
<b>Fuerza de Cierre Y-dir.</b>	35.3969 Tonne (39.0000 Ton U.S)
<b>Fuerza de Cierre Z-dir.</b>	23.2334 Tonne (25.6000 Ton U.S)
<b>Presión de inyección Requerida</b>	47.7702 MPa (6930.0000 psi)
<b>Temperatura real máxima</b>	261.3428 °C (502.0000 °F)
<b>Temperatura ponderada máxima</b>	261.3528 °C (502.0000 °F)
<b>Tensiones de Cizalla Máx</b>	0.3090 MPa (44.8000 psi)
<b>Tasa de Cizalla Máx</b>	197392.3000 1/sec
<b>Tiempo de Cálculo</b>	1133426.02 sec (314h=13 días).
<b>Tiempo de ciclo:</b>	18.57 sec

Tabla 7.7: Resumen de resultados de flujo. Matriz.

Tiempo de inyección.

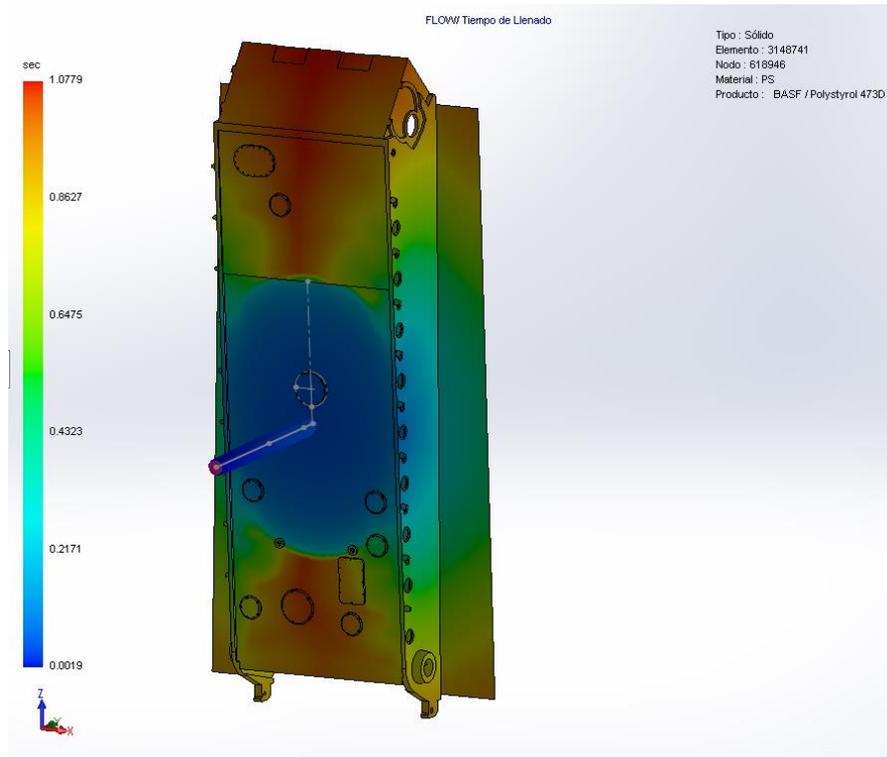


Figura 7.6: Tiempo de inyección. Pieza.

Tal y como se aprecia en la figura 7.6 el tiempo de inyección que habíamos definido es un poco inferior al tiempo real necesario para llenar la pieza. Durante los diversos estudios realizados, ésta configuración con canal de colada directo ha resultado ser la más óptima, que no la mejor, pues siempre se puede mejorar.

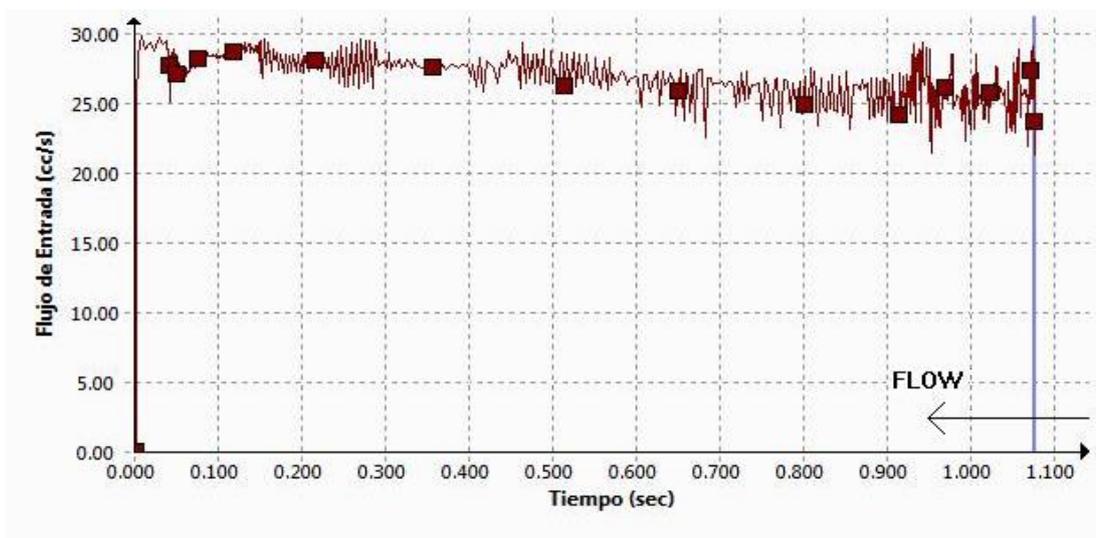


Gráfico 7.1: Flujo de entrada en función del tiempo. Pieza.

En la figura 7.7 se observa cómo se producen las líneas de soldadura. Por más estudios que se han hecho no ha sido posible eliminar dichas líneas, pues debido al pequeño espesor de la pieza, el área central de la misma ha resultado ser la única configuración que garantiza el completo llenado de la pieza. Si por el contrario, se ubica el punto de inyección en uno de los extremos de la pieza, el material fundido solidifica antes de llenar la cavidad por completo debido al contacto con las paredes frías del molde.

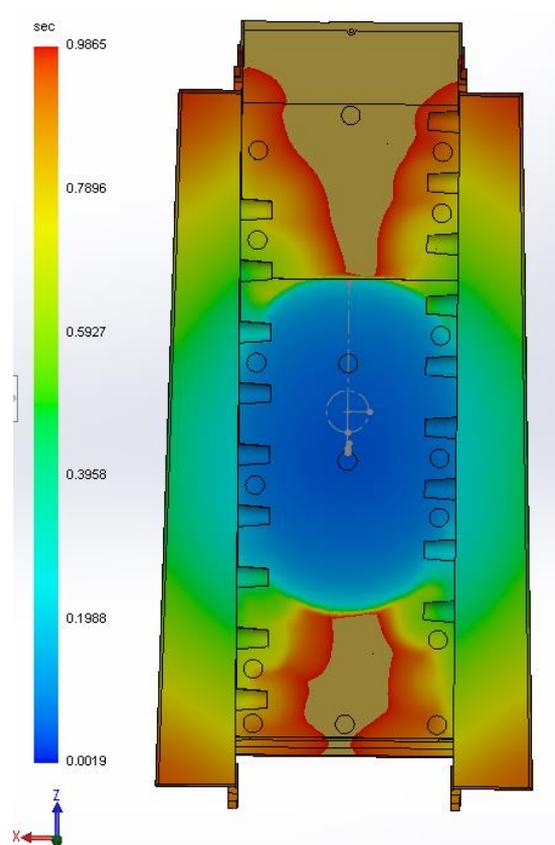


Figura 7.7: Detalle líneas de soldadura. Pieza.

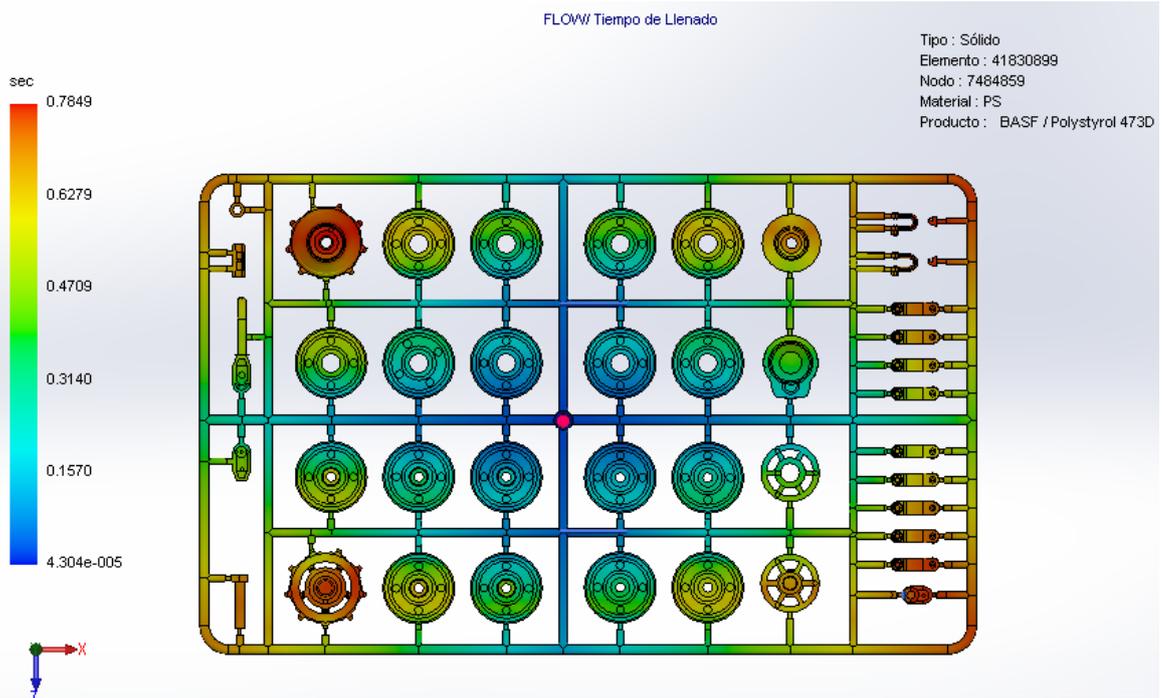


Figura 7.8: Tiempo de llenado. Matriz.

Por lo que a la matriz se refiere, el tiempo de cálculo de la etapa de llenado aumenta exponencialmente cuantas más derivaciones de flujo existan, para esta etapa, se necesitaron 13 días de cálculo ininterrumpido, por lo que se debía acercar una solución al primer intento.

Tal y como se puede apreciar con mayor detalle en la figura 7.9. las cavidades no se llenan de forma simultánea.

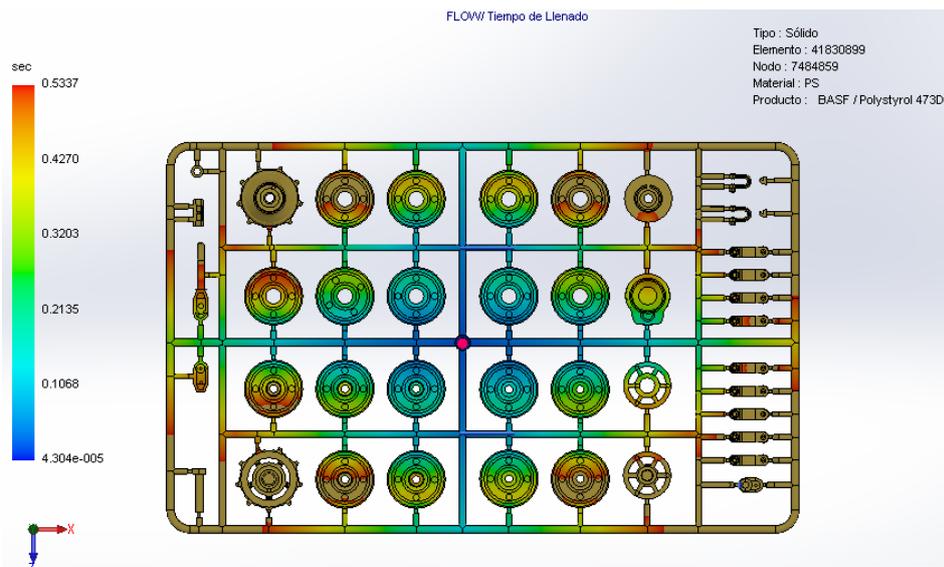


Figura 7.9: Detalle del tiempo de cálculo en  $t=0,5337s$ . Matriz.

El modelo sólido tenía problemas para detectar la continuidad entre canal y cavidad con tantas piezas. Solidworks tampoco especifica dónde se encuentran los errores, por lo que tras dos semanas intentando solucionarlo se desestimó esta vía.

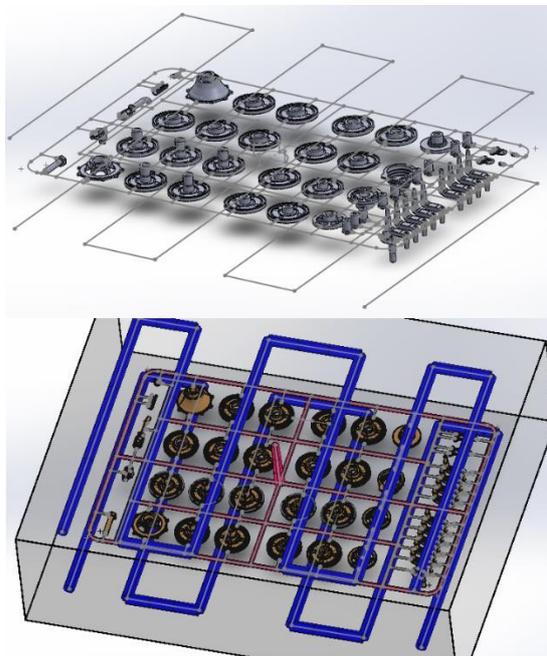


Figura 7.10. Generación de canales con la herramienta Solidworks Plastics.

Por lo cual, para poder realizar el mallado, se tuvieron que generar unos canales por medio de operaciones de saliente/barrido y especificar dicha región para excluirla del estudio (Figura 7.11). Sin embargo, de esta forma, no permite ejecutar el aplicativo de “Runner Balancing” el cual permite optimizar de forma automática el diámetro de los canales de colada, pero el tiempo de cálculo no se estima bajo para una red de canales tan compleja. Más adelante, en el apartado de deformaciones veremos cómo ha afectado esto a nuestro modelo.

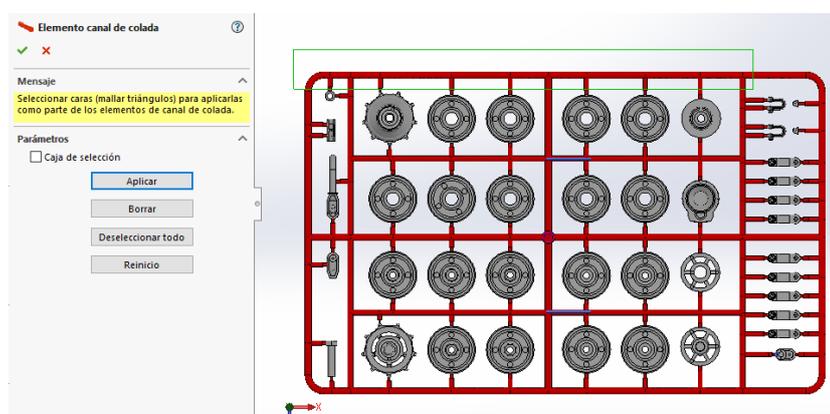


Figura 7.11: Exclusión de los canales de colada.

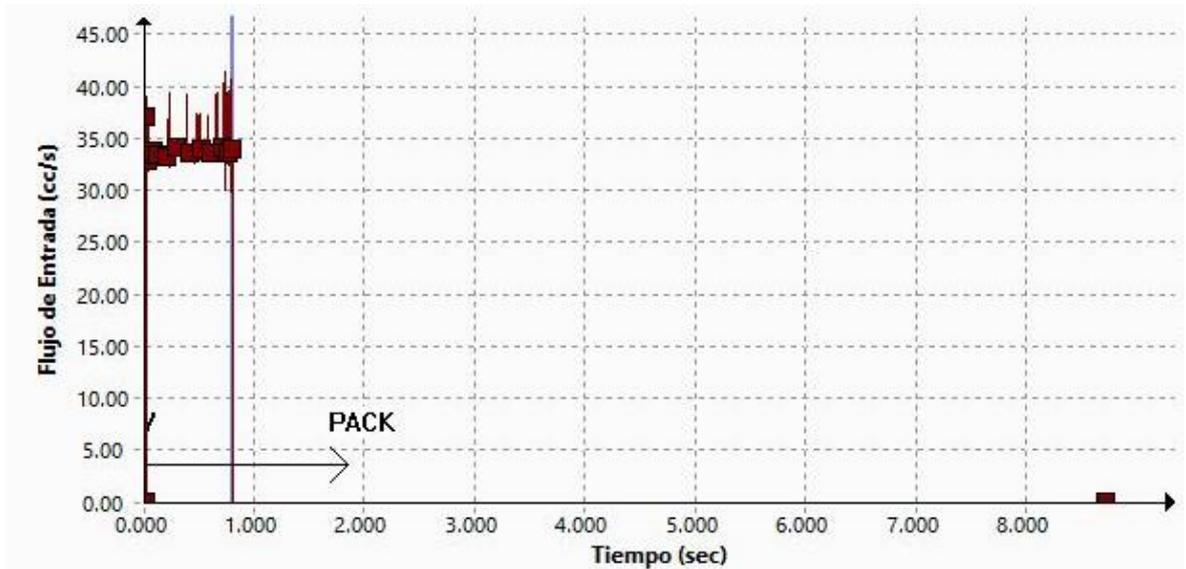


Gráfico 7.2: Flujo de entrada en función del tiempo. Matriz.

Al realizar la simulación de llenado de la matriz, se seleccionó el cálculo continuo de todas las etapas, esto provoca la superposición de las etapas de inyección y empaquetado en el mismo gráfico autogenerado en el informe de Solidworks, con lo cual no se puede corregir la base de tiempo del gráfico manualmente y dado el elevado tiempo de cálculo del estudio (13 días), recalcar la matriz no era viable.

Presión de inyección.

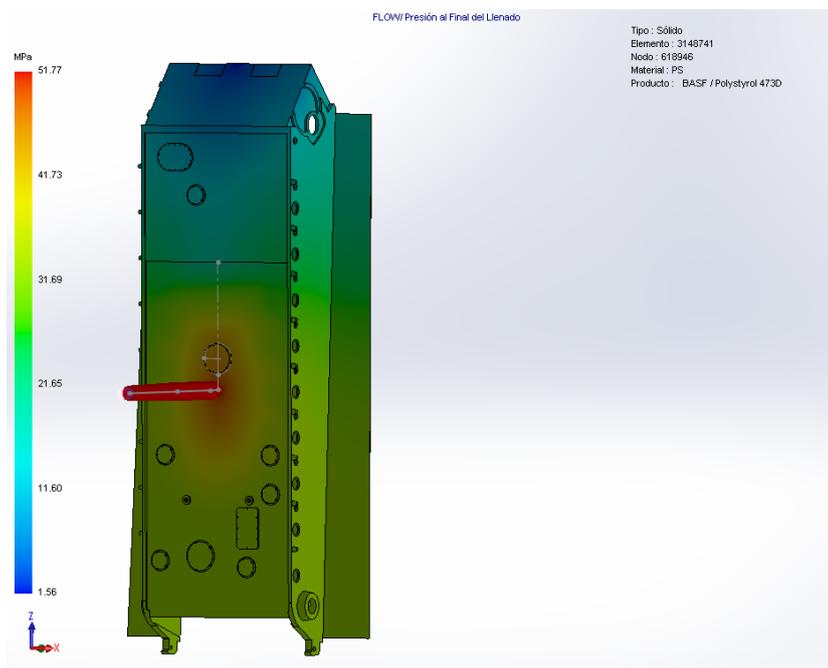


Figura 7.12: Presión de inyección. Pieza.

A pesar de ser un valor elevado de presión, éste está por debajo del 66% de la presión máxima de inyección de 140 MPa, lo cual es buena señal, pues se encuentra dentro del límite especificado. A diferencia de otros materiales, la caída de presión a medida que el material avanza por la cavidad, se ha mantenido mucho más homogénea. Esto quiere decir que será más difícil que se produzcan deformaciones no homogéneas de la pieza, donde unos sectores se deforman más que otros.

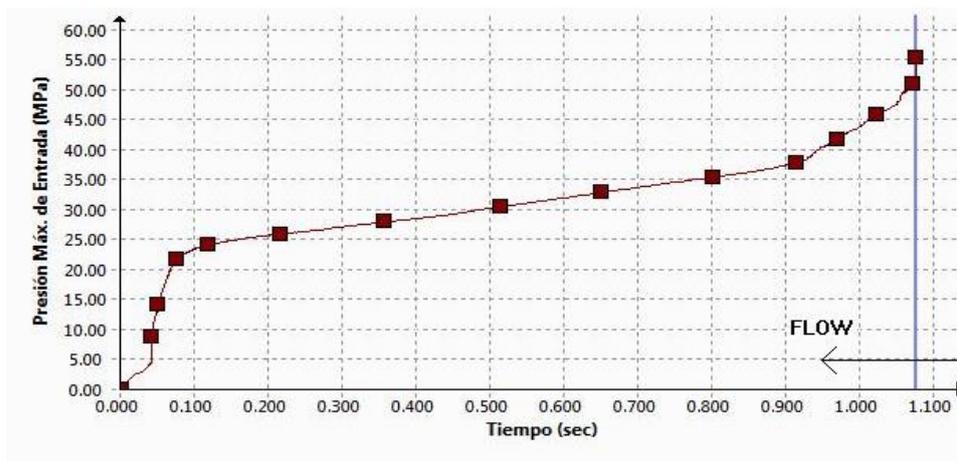


Gráfico 7.3: Presión máxima de inyección en función del tiempo de ciclo. Pieza.

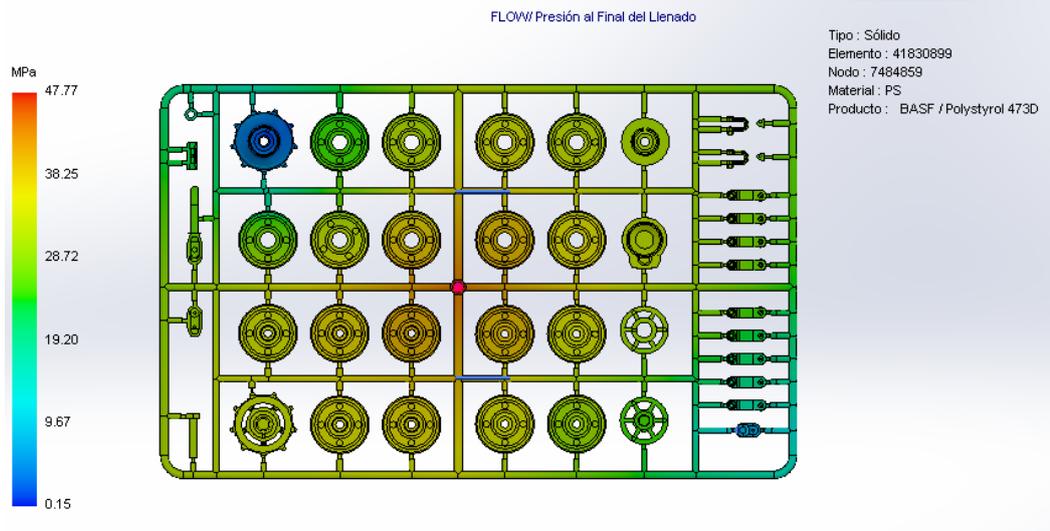


Figura 7.13: Presión de inyección. Matriz.

En cuanto a la matriz, podemos observar que ésta disminuye de una forma bastante crítica en la pieza (rueda10) en color azul, con respecto al resto de la matriz, se debería aproximar esa pieza lo máximo posible al punto de inyección con tal de corregirlo.

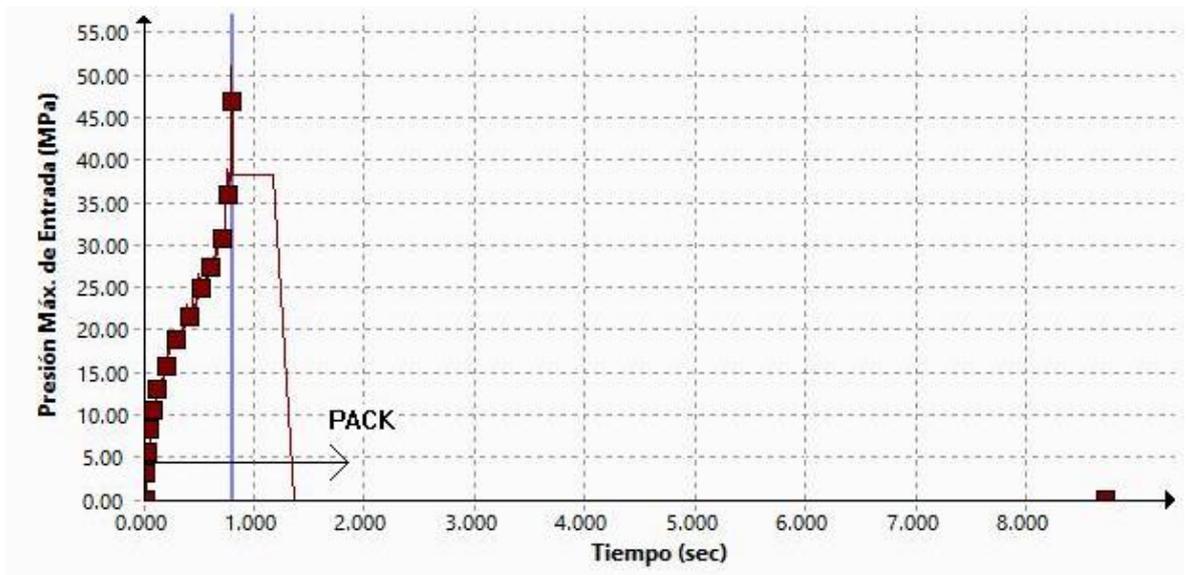


Gráfico 7.4: Presión máxima de inyección en función del tiempo de ciclo. Matriz.

Temperatura al final del llenado.

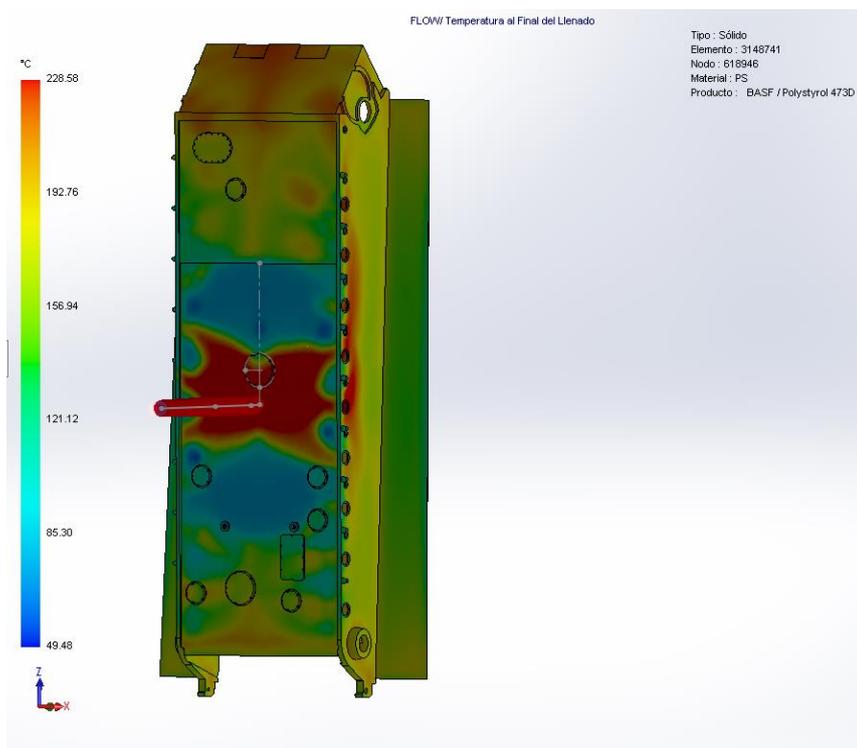


Figura 7.14: Temperatura al final del llenado. Pieza.

Esto nos permite determinar los puntos calientes más calientes de la pieza para saber por dónde instalar un sistema de refrigeración, pues nos interesa que toda la pieza se solidifique al mismo tiempo, podría ser necesario disponer de refrigeración extra en algunos puntos.

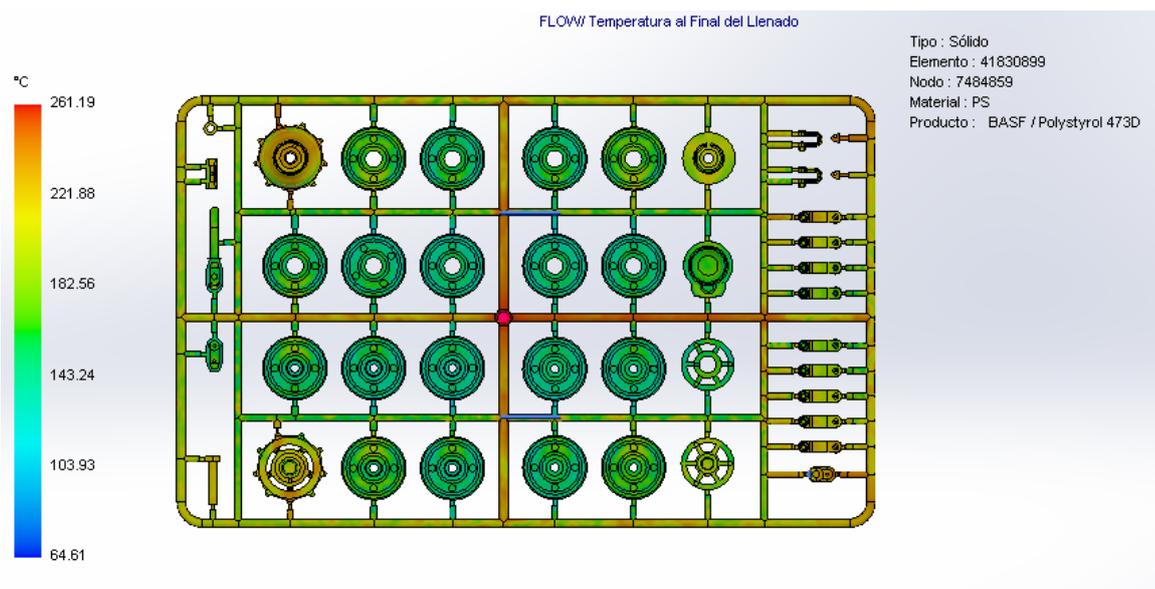


Figura 7.15: Temperatura al final del llenado. Matriz.

Aumento de la temperatura al final del llenado.

Puesto que la temperatura al final del llenado debido a la fricción y la cizalla se ha mantenido sin aumentar por encima de los 10°C de la temperatura inicial del material, existe un riesgo bajo o nulo de degradación del plástico.

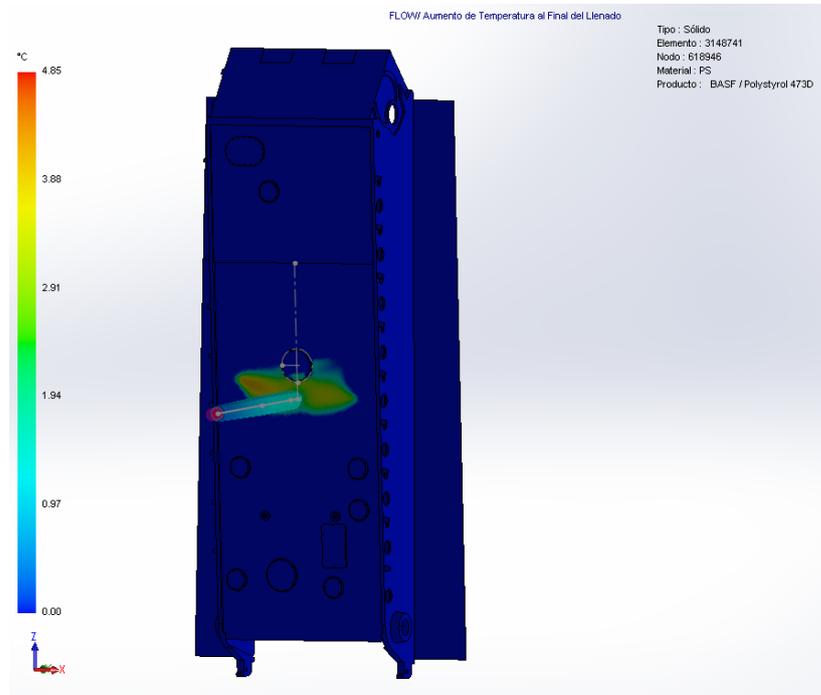


Figura 7.16: Aumento de la temperatura al final del llenado. Pieza.

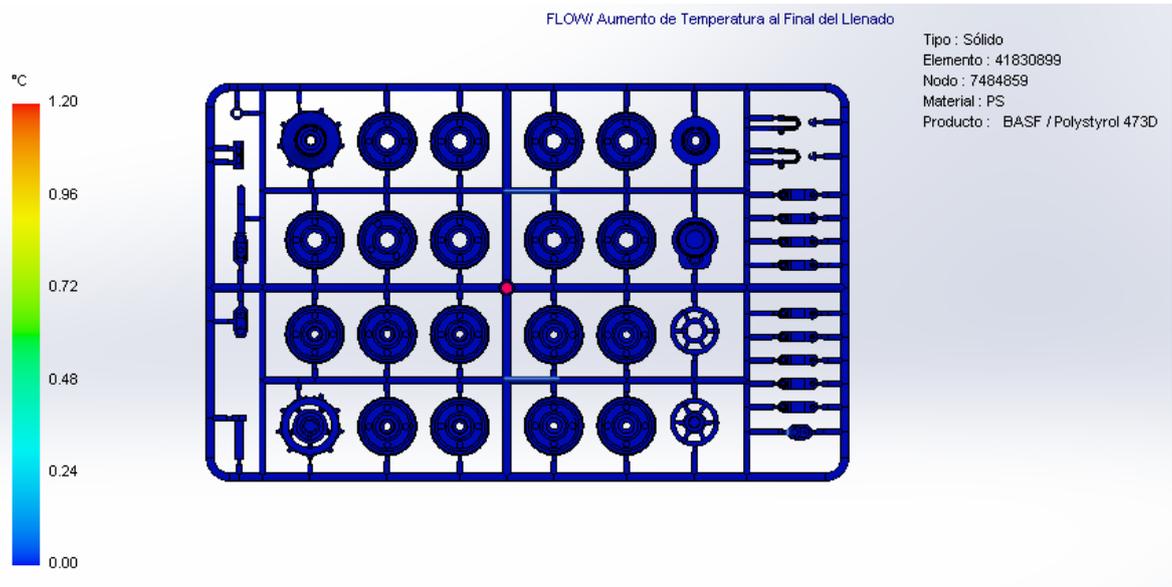


Figura 7.17: Aumento de la temperatura al final del llenado. Matriz.

Temperatura central del frente de flujo.

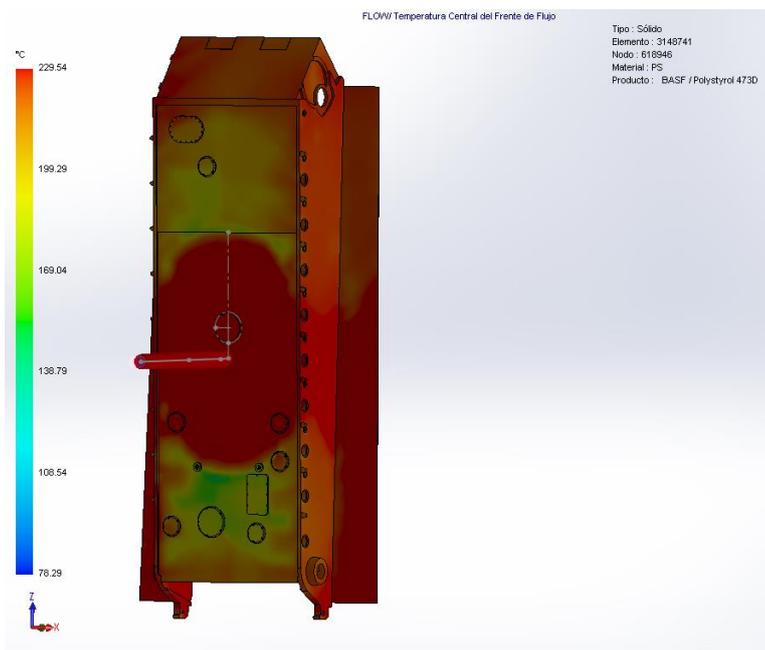


Figura 7.18: Temperatura central del frente de flujo. Pieza.

Dado el reducido espesor de la pieza ha sido imposible que la temperatura central del frente de flujo caiga por debajo de los 10°C recomendados respecto a la temperatura del material inicial. Esto podría afectar a las cualidades de la pieza moldeada.

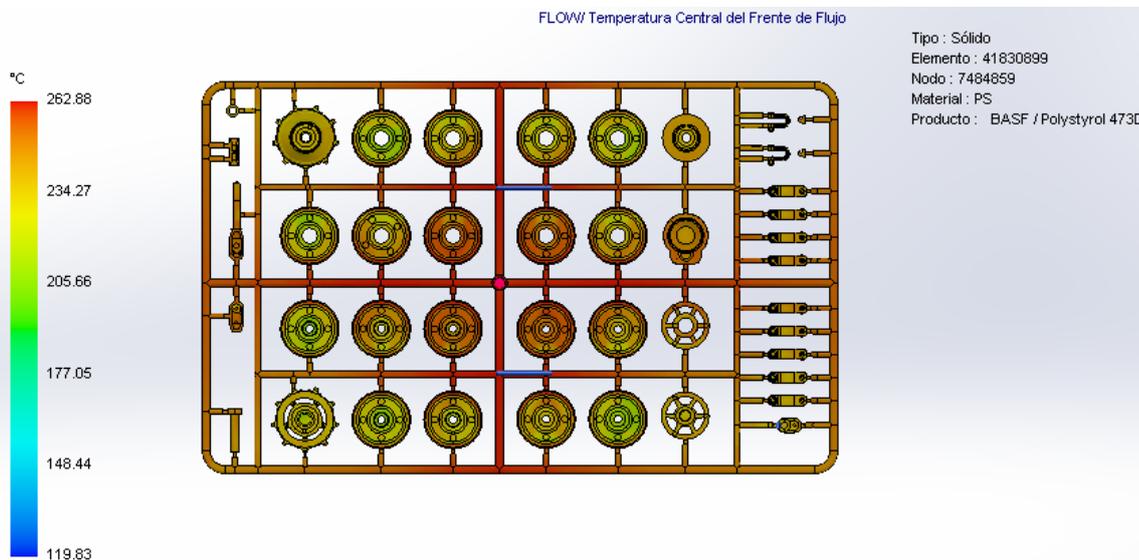


Figura 7.19: Temperatura central del frente de flujo. Matriz.

Tasa de cizalla.

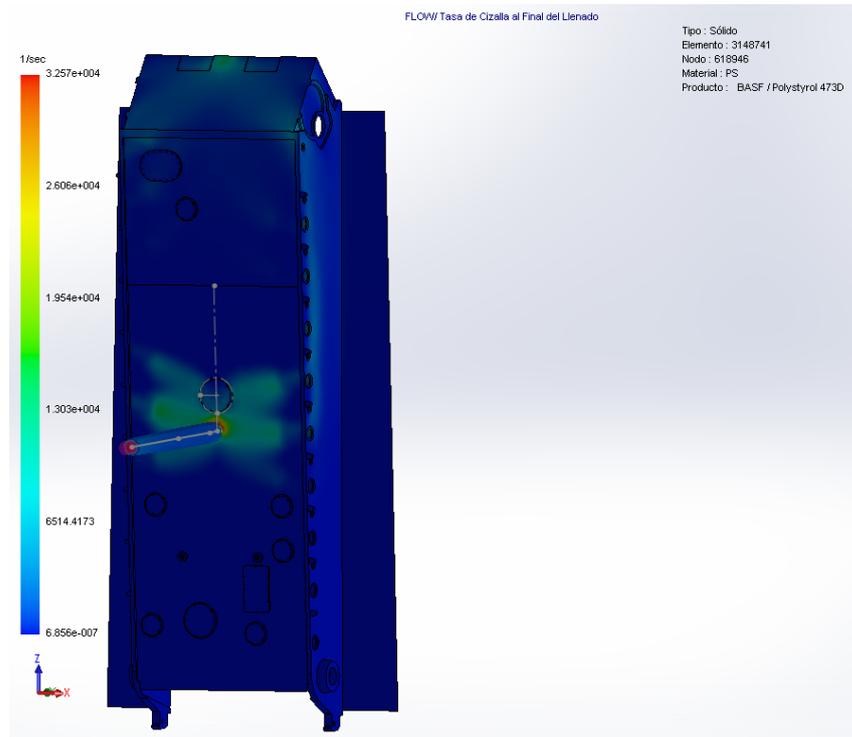


Figura 7.20: Tasa de cizalla al final del llenado. Pieza.

La tasa de cizalla es bastante elevada en la puerta de la pieza, allí dónde se encuentra la estrangulación del flujo. Esto podría originar marcas provocadas por el punto de inyección o incluso delaminación. Una opción sería ampliar la estrangulación, pero por otra parte, por motivos estéticos interesa que la puerta sea lo más pequeña posible para que no queden marcas en el momento de retirar la mazarota.

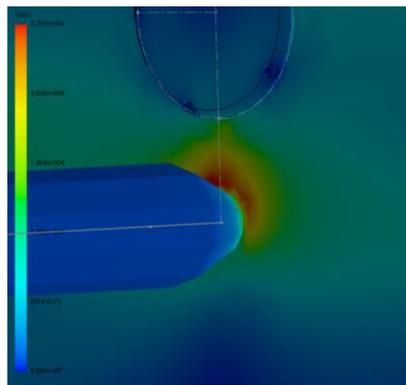


Figura 7.21: Detalle de la tasa de cizalla en la estrangulación. Pieza.

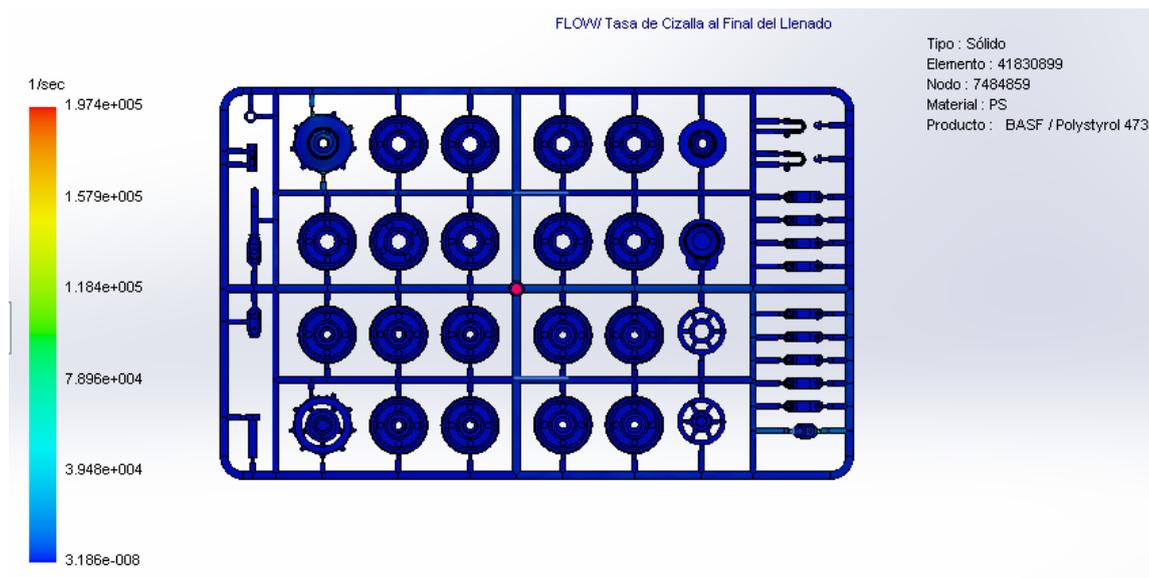


Figura 7.22: Tasa de cizalla al final del llenado. Matriz.

A priori todo parece normal, pero si nos acercamos podremos ver que, para la rueda10, la tasa de cizalla en las estrangulaciones es desorbitante. Se debería estudiar abordar la pieza de otra forma.

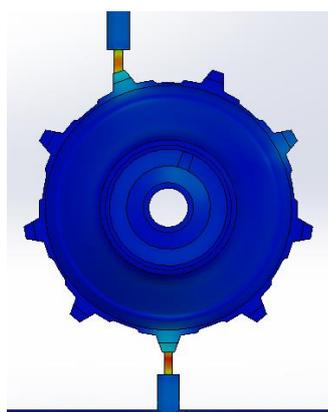


Figura 7.23: Detalle de la tasa de cizalla en la estrangulación. Matriz.

### Presión de ventilación.

Puesto que la presión de ventilación no ha aumentado por encima de los 4 Mpa. Existe un riesgo bajo o nulo de que se produzca una autoignición de la mezcla de gases. Véase como el punto de mayor presión se encuentra en la parte superior de la pieza con una presión de 1,4359 MPa.

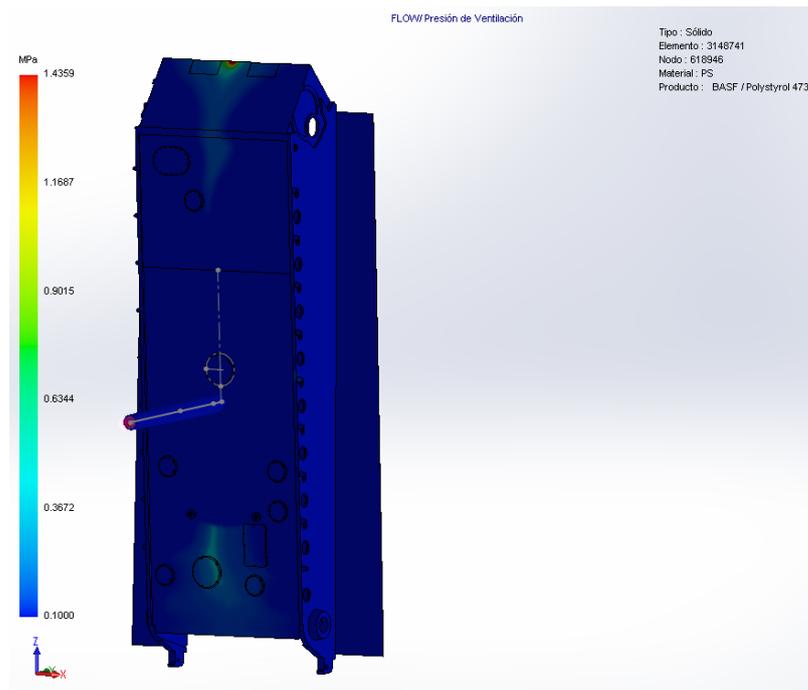


Figura 7.24: Presión de ventilación. Pieza.

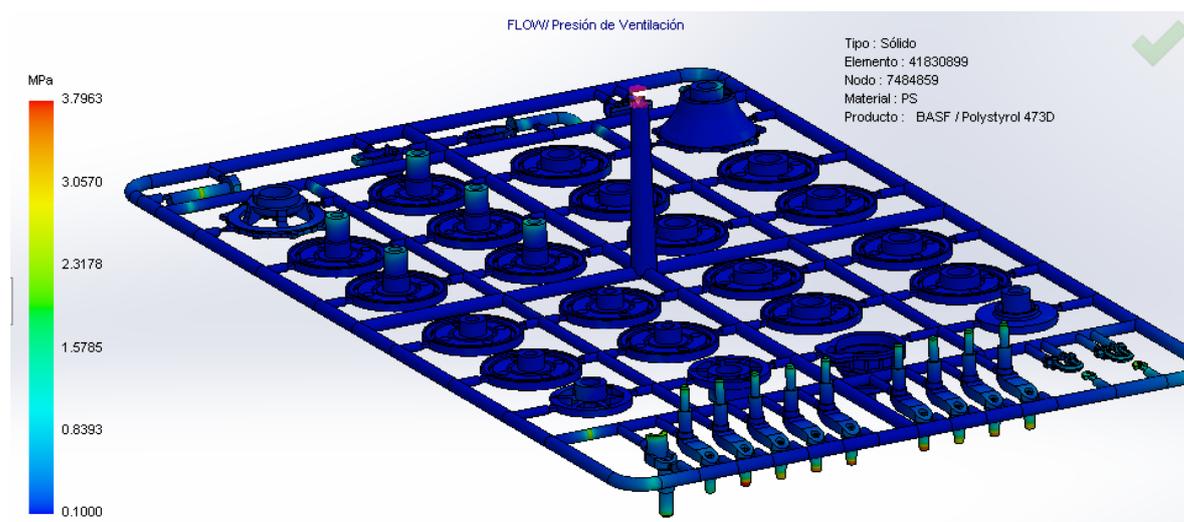


Figura 7.25: Presión de ventilación. Matriz.

En la matriz la presión de ventilación es más crítica en torno al grupo de piezas19 situadas al extremo de la matriz. Se sugiere instalar los expulsores en estos puntos para relajar la presión.

Facilidad de llenado.

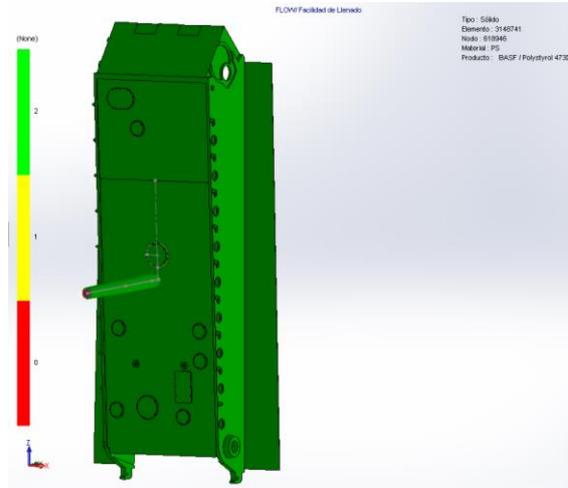


Figura 7.26: Facilidad de llenado. Pieza.

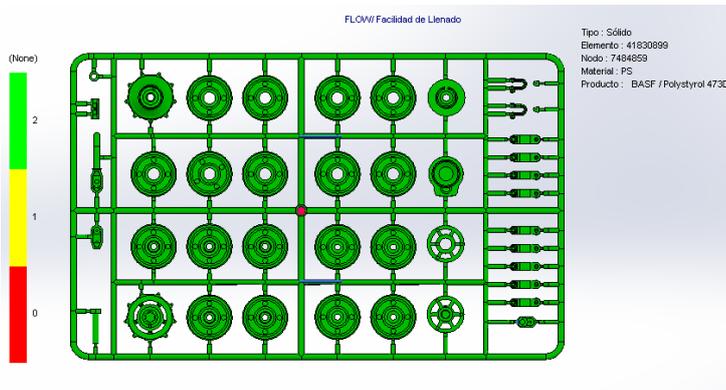


Figura 7.27: Facilidad de llenado. Matriz.

Región solidificada al final de la etapa de inyección.

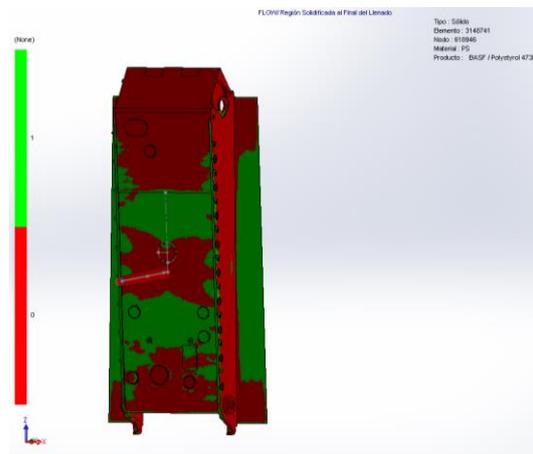


Figura 7.28: Región solidificada al final de la etapa de inyección. Pieza. (En verde).

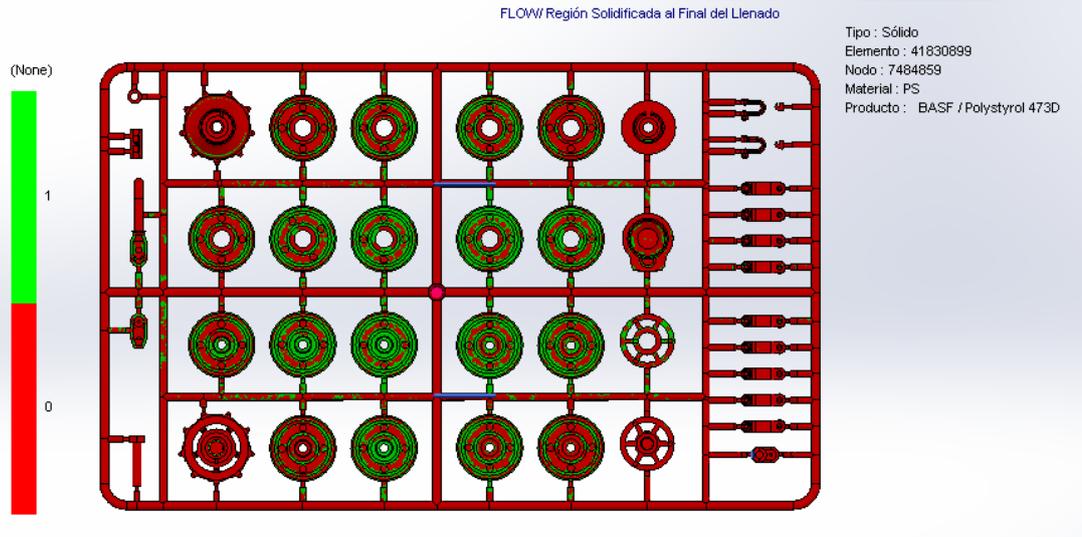


Figura 7.29 Región solidificada al final de la etapa de inyección. Matriz. (En verde).

### Tiempo de refrigeración al final del llenado.

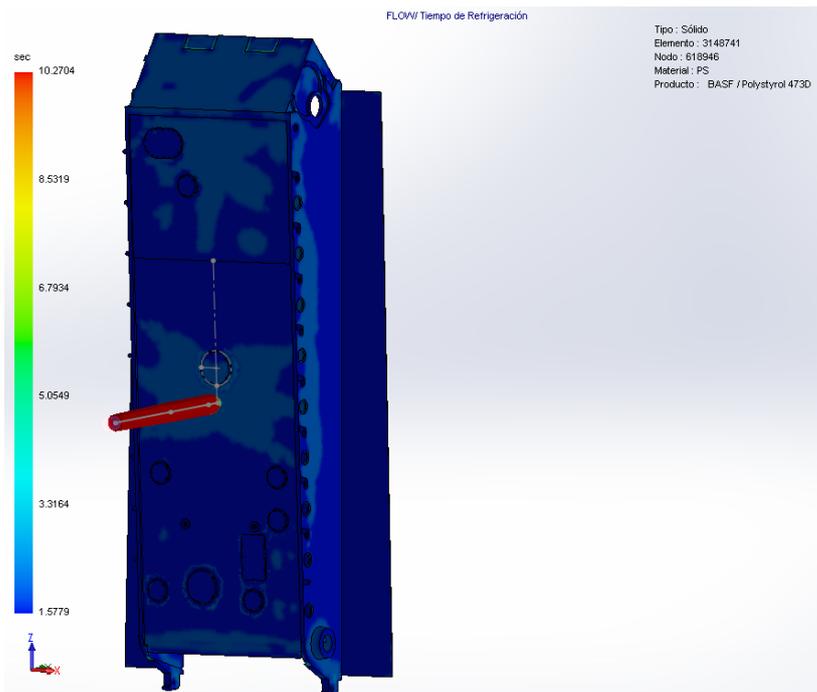


Figura 7.30: Tiempo de refrigeración al final del llenado. Pieza.

Mediante estos datos podremos definir correctamente los valores de la etapa de empaquetado, pues es importante saber cuánto tarda la puerta en solidificar, para saber durante cuánto más tiempo debemos seguir inyectando material, aunque la cavidad esté llena, para tratar de compensar la contracción del material. En la figura 7.18 podemos ver un detalle de la puerta y parece que solidifica en torno a los 2,5-3 segundos.

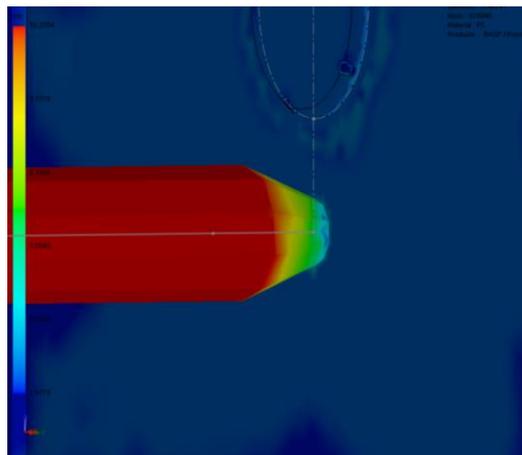


Figura 7.31: Detalle del tiempo refrigeración de la puerta. Pieza.

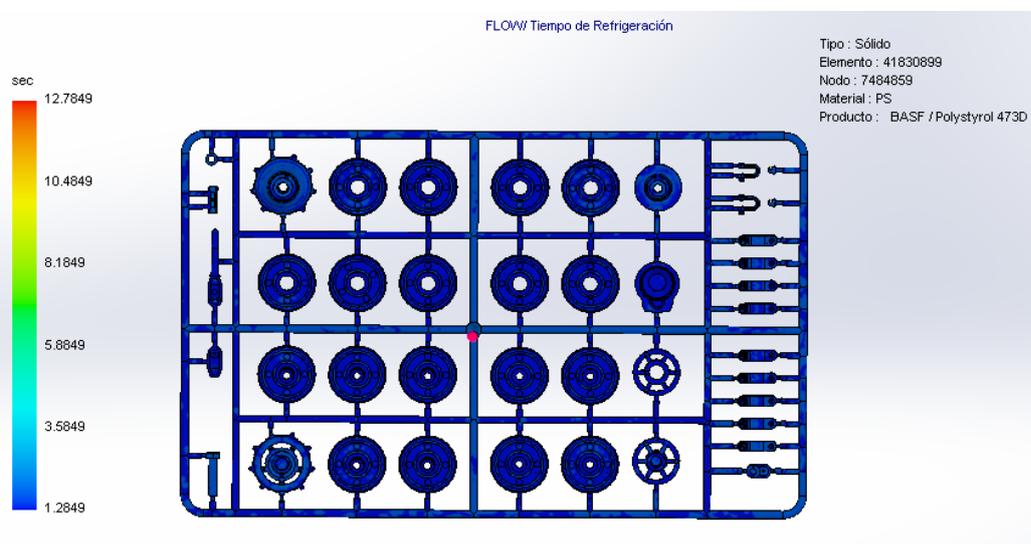


Figura 7.32: Detalle del tiempo refrigeración al final del llenado. Matriz.

A priori, no se vislumbra el punto donde se están requiriendo los 12,7849 segundos (Figura X.X), por lo que se asume que el tiempo de refrigeración está en torno a los 2,5 segundos.

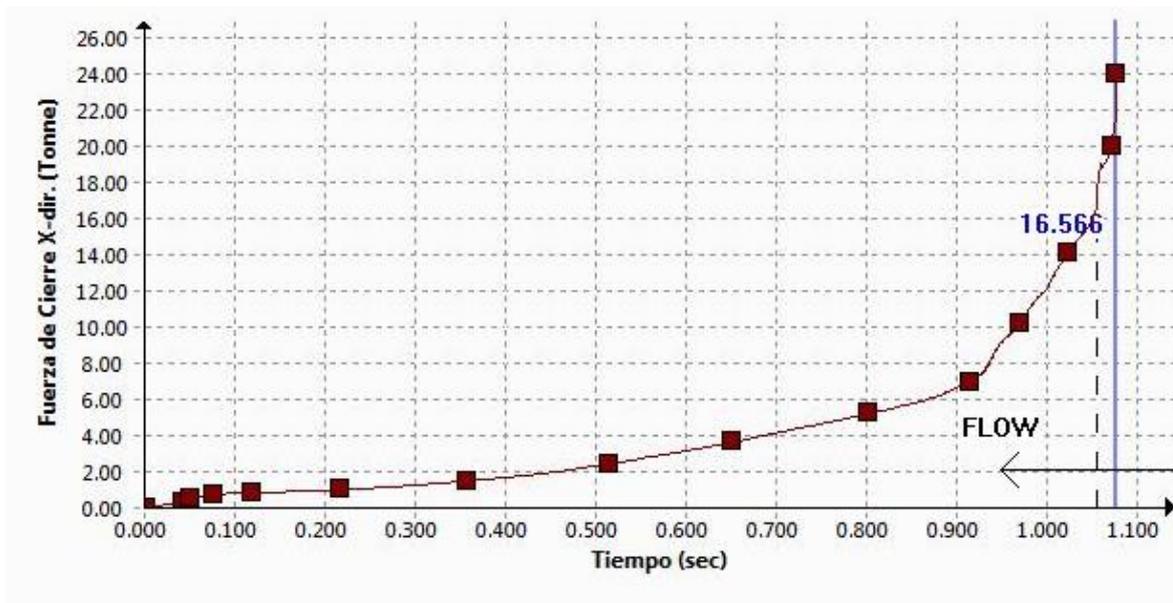


Gráfico 7.5: Fuerza de cierre en función del tiempo en la dirección X. Pieza.

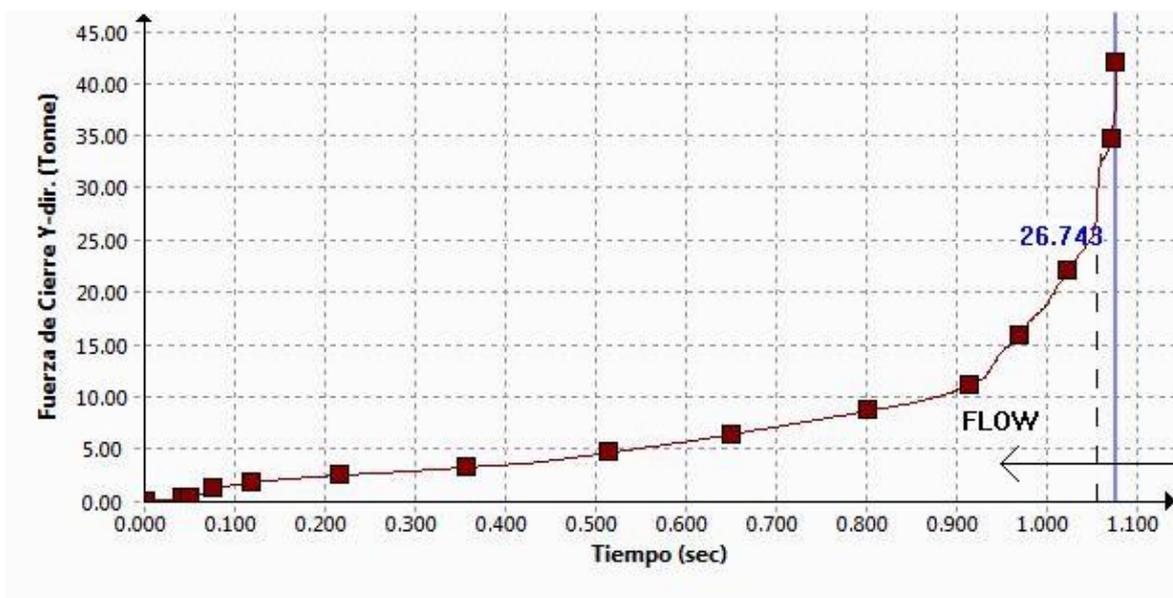


Gráfico 7.6: Fuerza de cierre en función del tiempo en la dirección Y. Pieza.

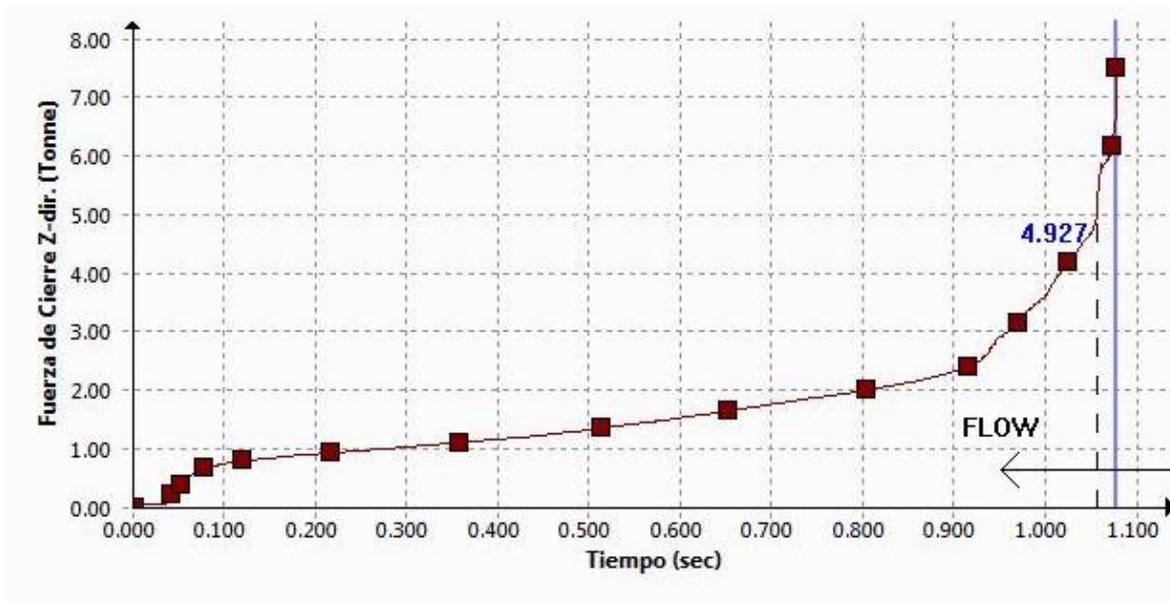


Gráfico 7.7: Fuerza de cierre en función del tiempo en la dirección Z. Pieza.

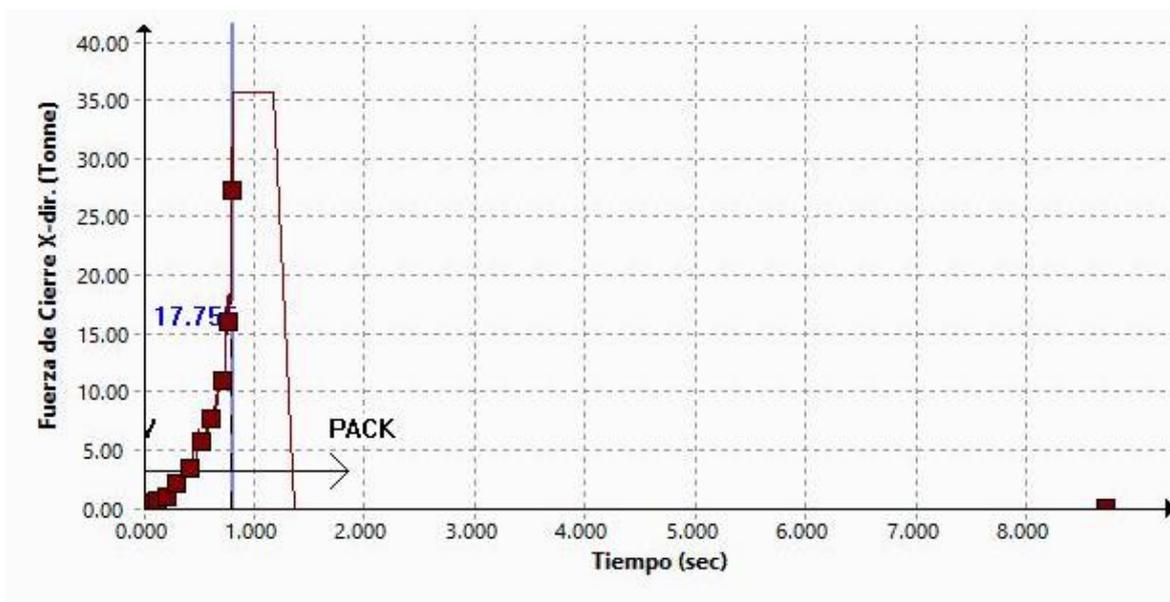


Gráfico 7.8: Fuerza de cierre en función del tiempo en la dirección X. Matriz.

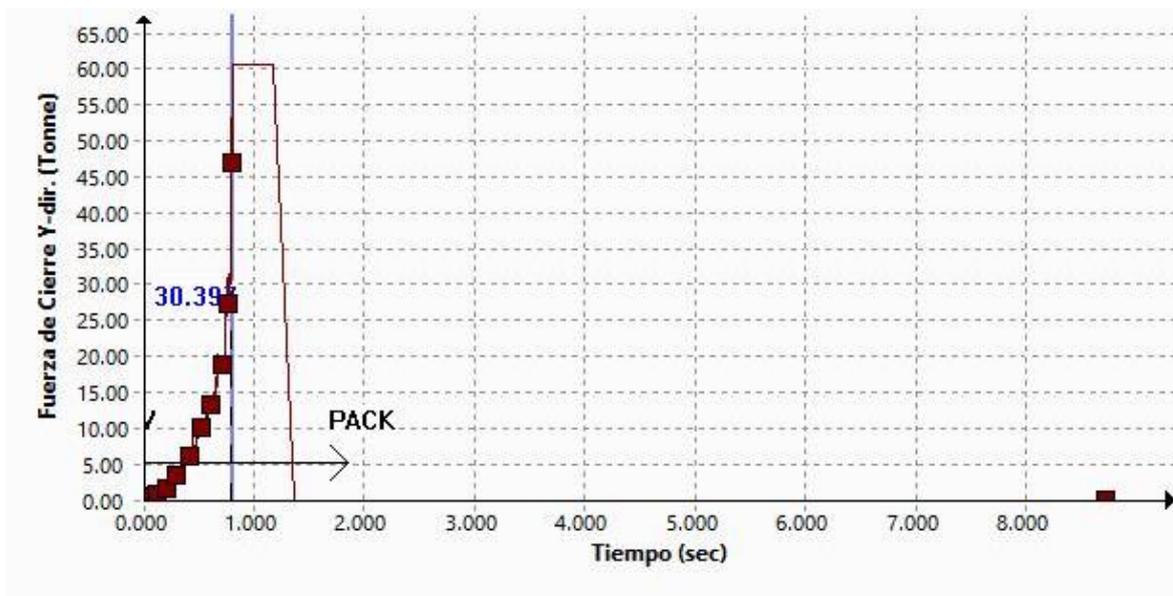


Gráfico 7.9: Fuerza de cierre en función del tiempo en la dirección Y. Matriz.

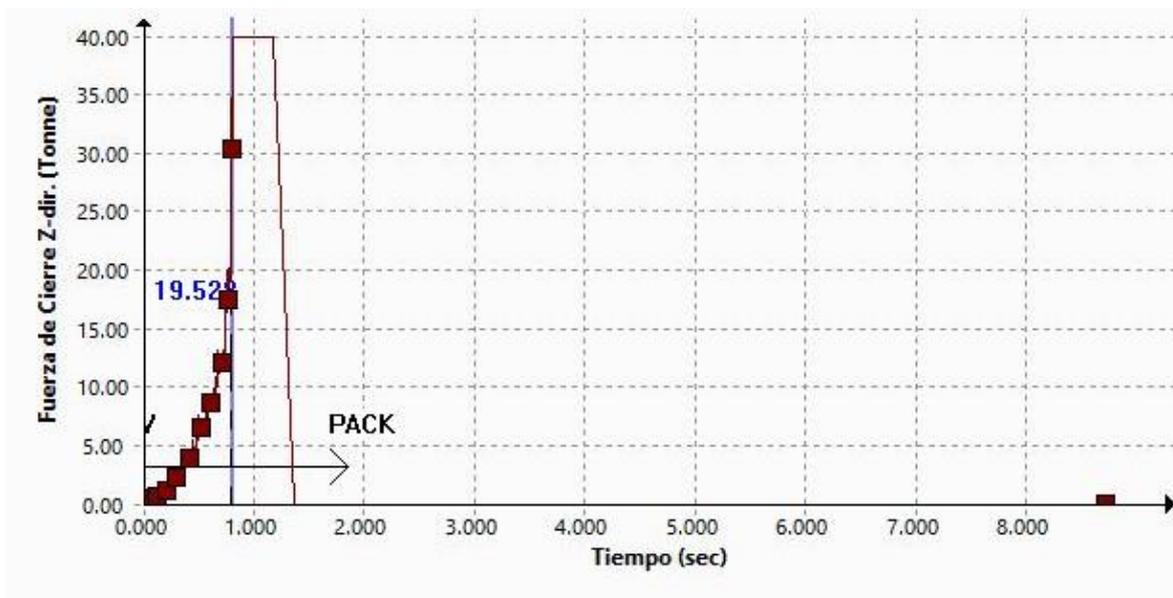


Gráfico 7.10: Fuerza de cierre en función del tiempo en la dirección Z. Matriz.

## 7.3. Empaquetado.

### 7.3.1. Parámetros del empaquetado.

#### Presión de mantenimiento o compactación.

Es la presión que se aplica al final de la etapa de inyección del material, cuando el molde se encuentra casi lleno. Se llama presión de mantenimiento o compactación, puesto que es la presión que se aplica durante la etapa de compactación, cuando algunas partes del material han comenzado a enfriarse o contraerse, y obliga a que el molde se acabe de llenar y se obtenga una pieza con una densidad uniforme. (Beltrán y Marcilla, 2012).

#### Tiempo de mantenimiento de la presión.

El mantenimiento de la presión está pensado para compensar la contracción del plástico en solidificación. Por este propósito es importante que el cambio en la presión de mantenimiento se produzca exactamente en el llenado volumétrico de la cavidad.

Dependiendo de la geometría del componente, se pueden optimizar la aparición de rechupes con tan solo escoger un buen tiempo de mantenimiento de la presión.

Si el diseño de la geometría del material o la entrada del molde no son los correctos, un tiempo de mantenimiento demasiado elevado podría resultar en una sobrealimentación del molde que resultaría en la aparición de rebabas en la pieza y menoscabar su resistencia al impacto. (BASF, 2001).

#### Presión posterior o de retroceso.

Es la presión que se aplica al tornillo mientras retrocede, una vez finalizada la etapa de compactación. Una vez que el molde está completamente lleno el tornillo comienza a girar para plastificar más material. Este material comienza a alojarse delante del tornillo, obligando a que el tornillo retroceda, sin embargo no se permite que el tornillo retroceda libremente si no que se aplica una cierta presión posterior para conseguir que el material se mezcle y homogenice adecuadamente. (Beltrán y Marcilla, 2012).

#### Tiempo de enfriamiento.

El criterio para un tiempo de enfriamiento óptimo es el desmoldeo de la pieza sin ninguna deformación duradera o posterior. Es una de las variables más importantes para conseguir una pieza de buena calidad.

Es el tiempo que la pieza requiere para enfriarse hasta que ha solidificado y además ha adquirido la rigidez suficiente para poder ser extraída del molde sin que se deforme. Las partes más externas de las piezas se enfrían a velocidades más rápidas.

El tiempo de enfriamiento debe ser suficiente para que un espesor considerable de la pieza (al menos el 95% de la pieza) se encuentre frío para evitar que la pieza se deforme. Lógicamente cuanto

mayor sea el espesor de la pieza que se está moldeando mayor será el tiempo mínimo de enfriamiento requerido.

Como media una pieza de 1.5mm de espesor requiere de 9 a 12 segundos para solidificar y adquirir suficiente resistencia para ser extraída del molde sin deformaciones. (Beltrán y Marcilla, 2012).

### 7.3.2. Resultados del empaquetado.

<b>Tiempo de mantenimiento de la presión</b>	2.5 sec
<b>Tiempo Total de la Etapa de Empaquetado</b>	14.5 sec

Tabla 7.8: Ajustes del empaquetado. Pieza.

<b>Fuerza de Cierre X-dir.</b>	40.3357 Tonne (44.4000 Ton U.S)
<b>Fuerza de Cierre Y-dir.</b>	70.9227 Tonne (78.2000 Ton U.S)
<b>Fuerza de Cierre Z-dir.</b>	13.4221 Tonne (14.8000 Ton U.S)
<b>Temperatura real máxima</b>	187.2137 °C (369.0000 °F)
<b>Temperatura ponderada máxima</b>	240.1938 °C (464.0000 °F)
<b>Tensiones de Cizalla Máx</b>	0.0000 MPa
<b>Tasa de Cizalla Máx</b>	0.0000 1/sec
<b>Tensiones Residuales Máx</b>	157.8328 MPa (22900.0000 psi)

Tabla 7.9: Resumen de resultados del empaquetado. Pieza.

<b>Tiempo de mantenimiento de la presión</b>	2.5 sec
<b>Tiempo Total de la Etapa de Empaquetado</b>	8.5 sec

Tabla 7.10: Ajustes del empaquetado. Matriz.

<b>Fuerza de Cierre X-dir.</b>	35.7105 Tonne (39.4000 Ton U.S)
<b>Fuerza de Cierre Y-dir.</b>	60.6407 Tonne (66.8000 Ton U.S)
<b>Fuerza de Cierre Z-dir.</b>	39.9503 Tonne (44.0000 Ton U.S)
<b>Temperatura real máxima</b>	255.9164 °C (493.0000 °F)
<b>Temperatura ponderada máxima</b>	261.2743 °C (502.0000 °F)
<b>Tensiones de Cizalla Máx</b>	0.0000 MPa
<b>Tasa de Cizalla Máx</b>	0.0000 1/sec
<b>Tensiones Residuales Máx</b>	156.9599 MPa (22800.0000 psi)

Tabla 7.11: Resumen de resultados del empaquetado. Matriz.

### Presión al final del empaquetado.

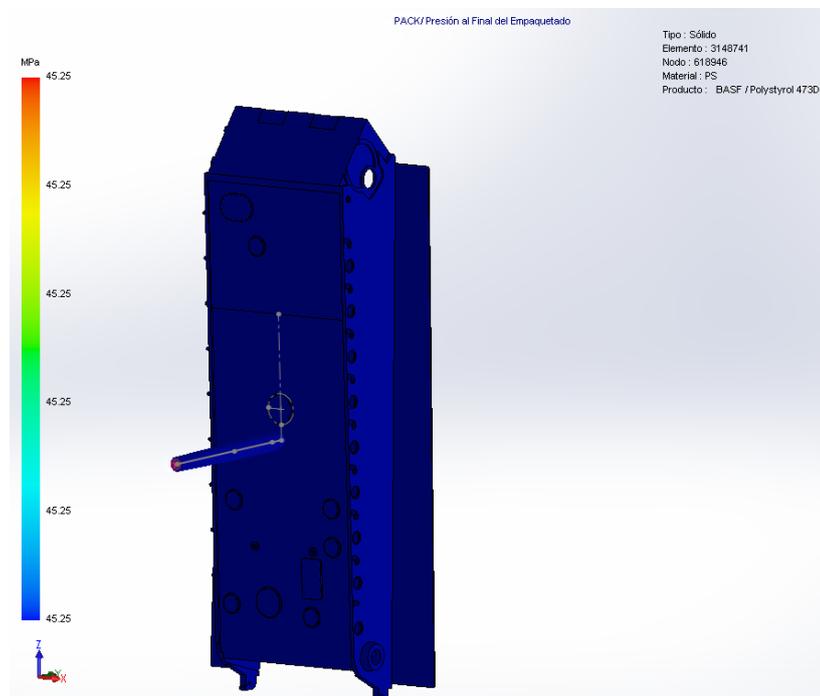


Figura 7.33: Presión al final del empaquetado. Pieza.

Aquí es donde se origina el principal problema de esta pieza, y es que es incapaz de eliminar la presión remanente de 45,25 MPa, antes de que la pieza llegue a la temperatura de expulsión de 120°C. (Figura 7.20). Esto puede ser la causa de las tensiones residuales originadas tal y como se muestra en la figura 7.21.

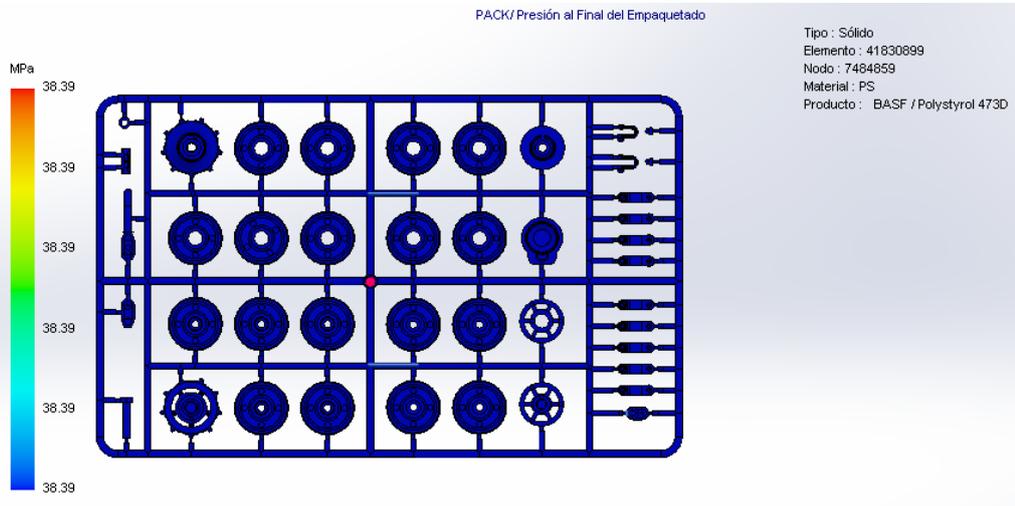


Figura 7.34: Presión al final del empaquetado. Matriz.

### Temperatura al final del empaquetado.

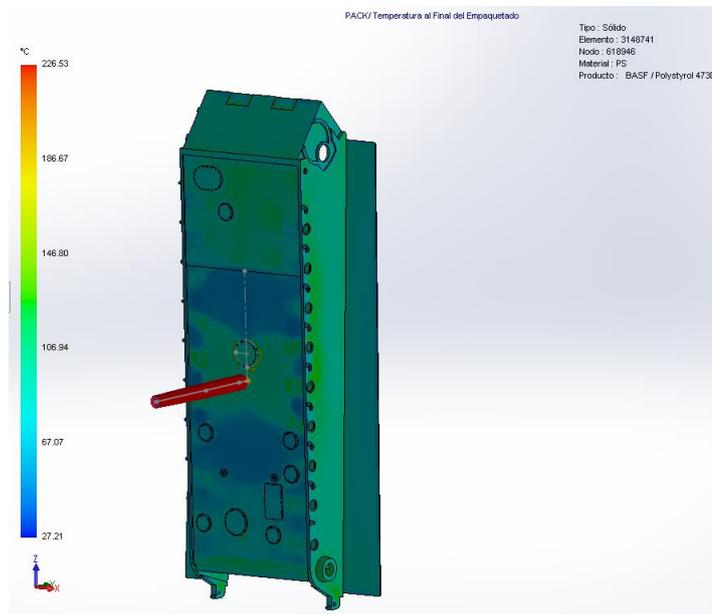


Figura 7.35: Temperatura al final del empaquetado. Pieza.

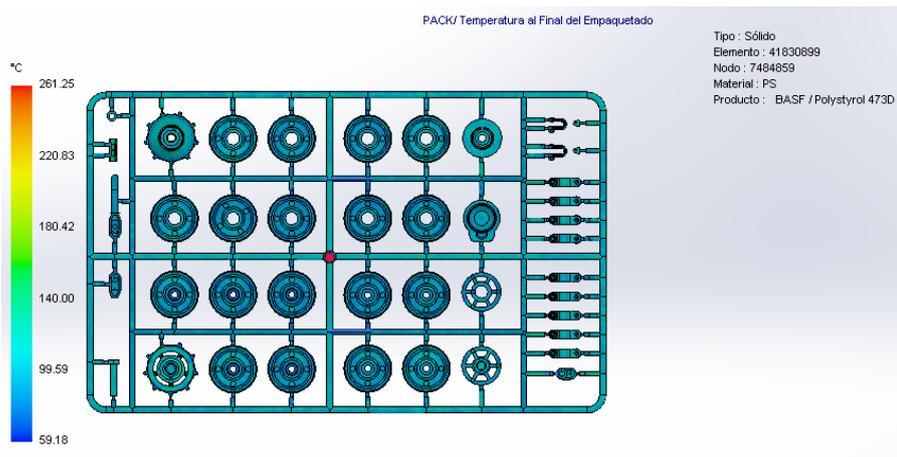


Figura 7.36: Temperatura al final del empaquetado. Matriz.

Tensiones residuales al final del post-llenado.

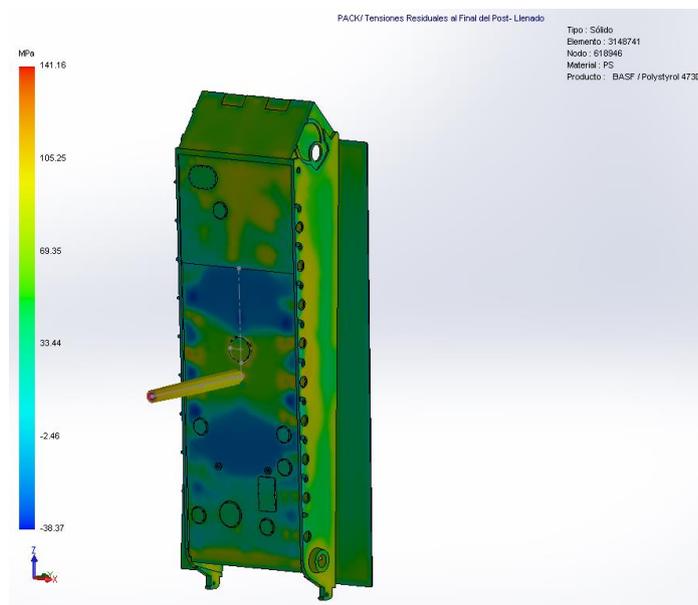


Figura 7.37: Tensiones residuales al final del post-llenado. Pieza.

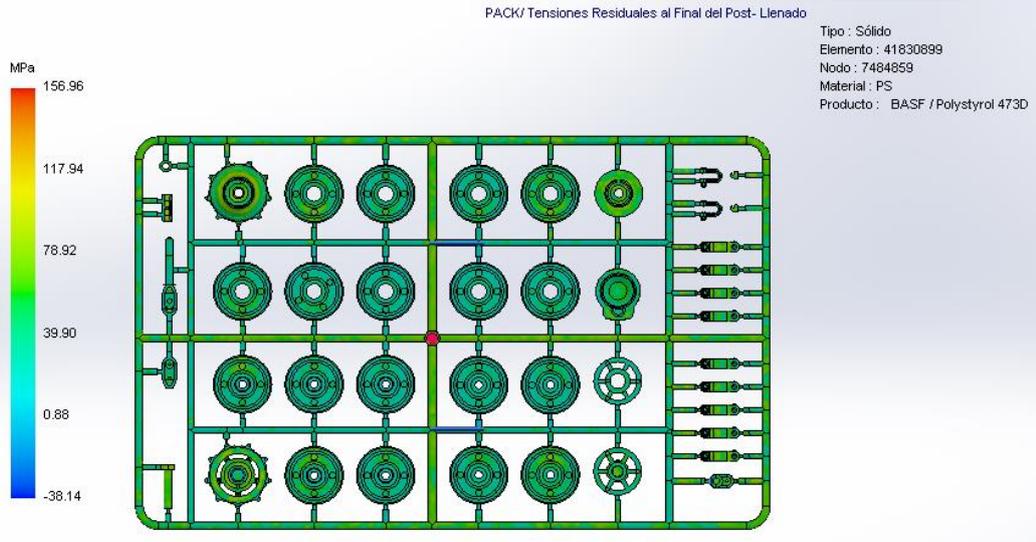


Figura 7.38: Tensiones residuales al final del post-llenado. Matriz.

Región solidificada al final del post-llenado.

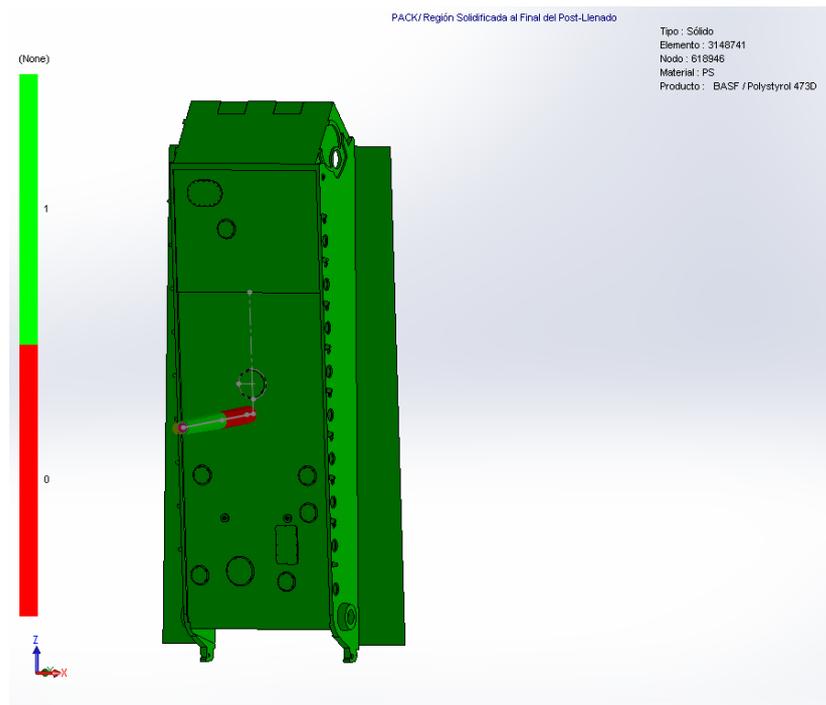


Figura 7.39: Región Solidificada al final del post-llenado. Pieza. (En verde).

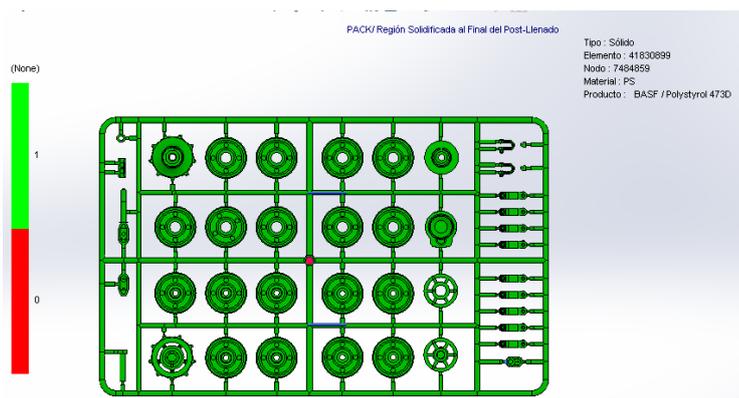


Figura 7.40: Región Solidificada al final del post-llenado. Matriz. (En verde).

## 7.4. Deformaciones.

### 7.4.1. Parámetros de deformación.

La contracción de un componente se determina tanto por la naturaleza del material como por las condiciones del proceso y la geometría del molde (forma del molde, grosor de pared y posición del bebedero). Las interacciones entre estos factores hacen casi imposible predecir las deformaciones con exactitud.

Hay que hacer distinción entre dos tipos de deformaciones, aquellas producidas por el enfriamiento no uniforme de la pieza y aquellas por el impedimento de contracción del material por parte del molde.

El encogimiento del material afecta a la pieza moldeada en otras dos formas a parte sus dimensiones. Los rechupes y vacantes son defectos causados por el enfriamiento del material dentro del molde. La corrección de estos problemas requiere un mayor empaquetado de la pieza moldeada para compensar el encogimiento de la pieza. En ocasiones, se requieren cambios para evitar secciones gruesas de la pieza y minimizar el encogimiento a niveles aceptables.

Un aumento de la temperatura del molde podría prolongar el tiempo de enfriamiento del material y permitir un mayor tiempo de mantenimiento. (BASF, 2001).

Para lidiar con las diferencias en el encogimiento entre dos puntos distintos de la pieza, una opción podría ser calentar las dos mitades del molde a temperaturas diferentes. Desgraciadamente Solidworks no permite este tipo de análisis.

**7.4.2. Resultados de deformación.**

<b>Temperatura ambiente</b>	30 °C
<b>Dirección de la gravedad</b>	-Z

Tabla 7.12: Ajustes de deformación: Pieza y Matriz.

<b>X Dirección Desplazamiento</b>	1.6455 mm (0.0648 in)
<b>Y Dirección Desplazamiento</b>	1.6548 mm (0.0652 in)
<b>Z Dirección Desplazamiento</b>	2.0365 mm (0.0802 in)
<b>Desplazamiento total máximo</b>	1.2829 mm (0.0505 in)
<b>Tiempo de cálculo</b>	1783.43 sec

Tabla 7.13: Resumen de resultados de deformación. Pieza.

<b>X Dirección Desplazamiento</b>	0.0073 mm (0.0003 in)
<b>Y Dirección Desplazamiento</b>	0.0129 mm (0.0005 in)
<b>Z Dirección Desplazamiento</b>	0.0072 mm (0.0003 in)
<b>Desplazamiento total máximo</b>	0.0086 mm (0.0003 in)
<b>CPU Time</b>	68307.20 sec

Figura 7.14: Resumen de resultados de deformación. Matriz.

Desplazamientos.

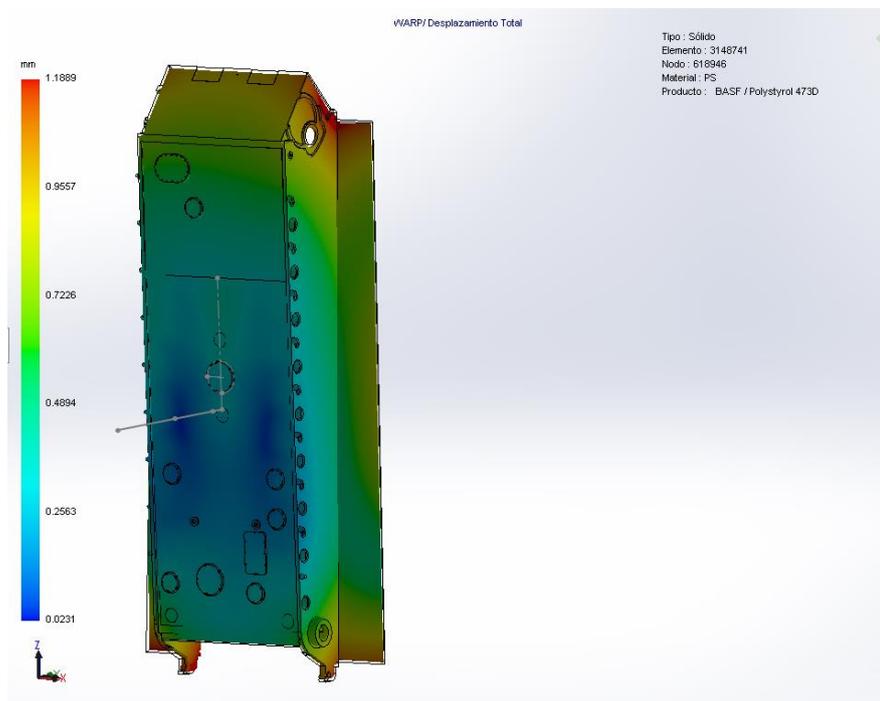


Figura 7.41: Desplazamiento total. Pieza.

En la figura 7.23 podemos observar los desplazamientos totales de la pieza final. Éstos aumentan a medida que se alejan de la puerta, sobre todo en el eje de las Z, debido a la pérdida de presión del flujo durante la inyección. En las figuras 7.24 y 7.25, podemos ver estos valores descompuestos.

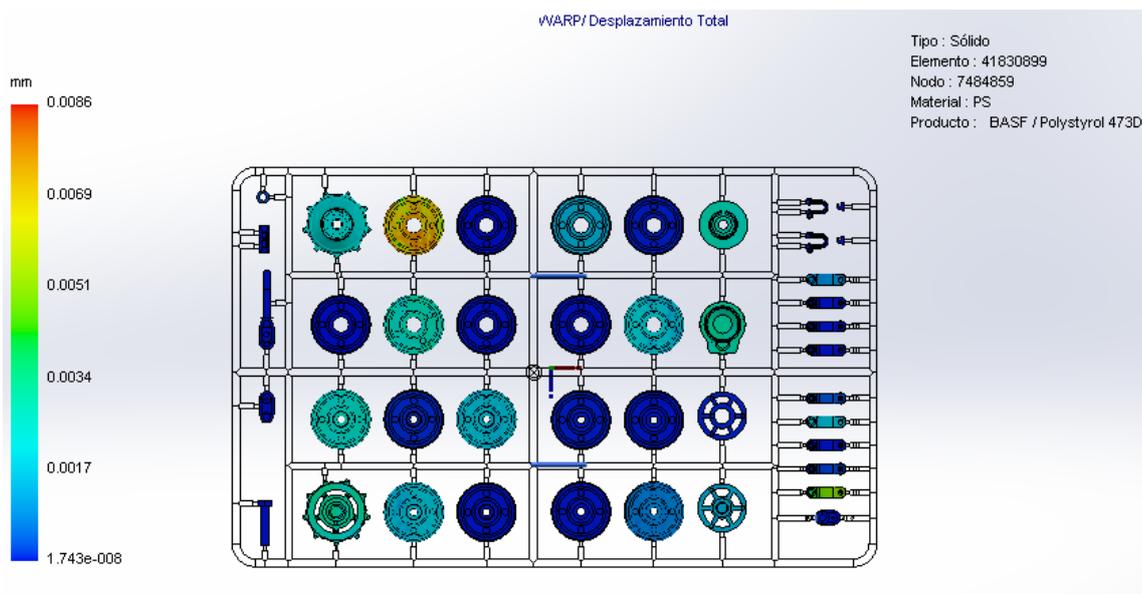


Figura 7.42: Desplazamiento total. Matriz.

En la figura 7.30 podemos apreciar que, en este caso, no ha supuesto ningún problema el no haber configurado la optimización de los canales de colada. Pues la deformación se encuentra dentro de tolerancia.

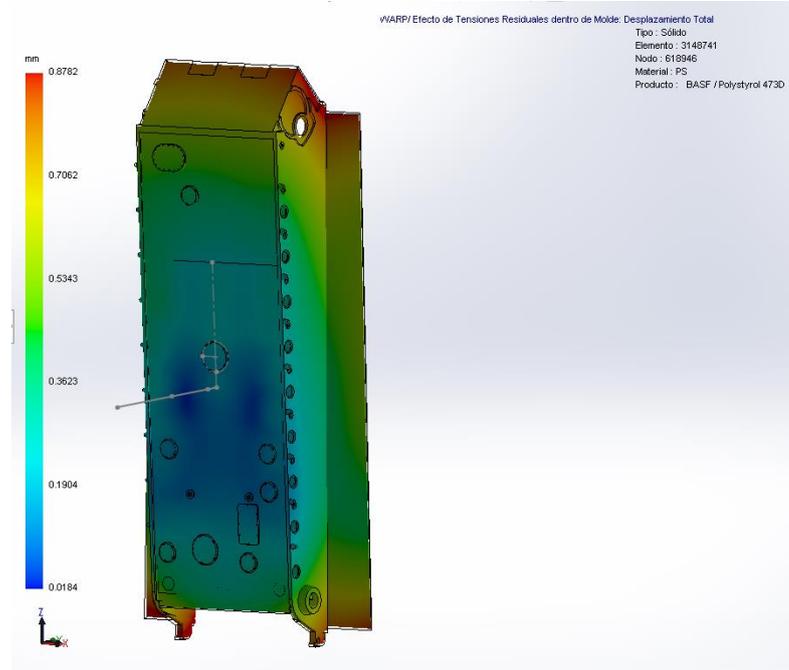


Figura 7.43: Desplazamiento debido al efecto de las tensiones residuales. Pieza.

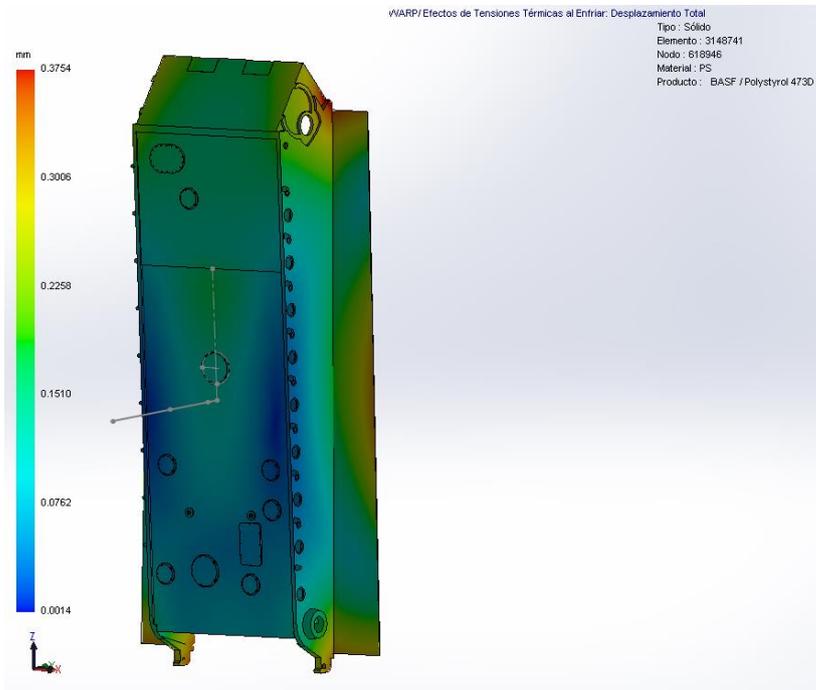


Figura 7.44: Desplazamiento debido a tensiones térmicas al enfriar. Pieza.

Rechupes.

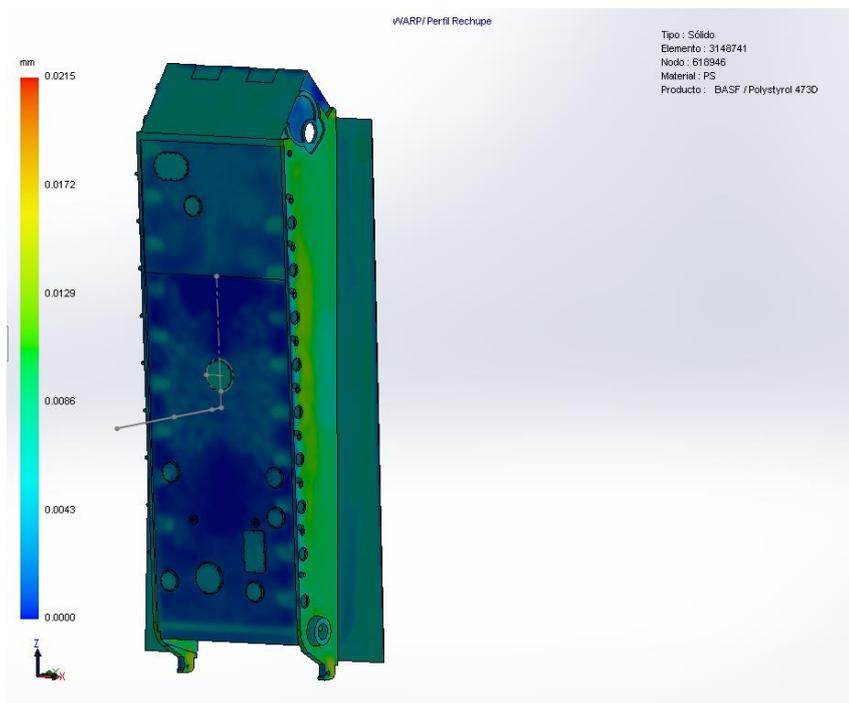


Figura 7.45: Rechupes. Pieza.

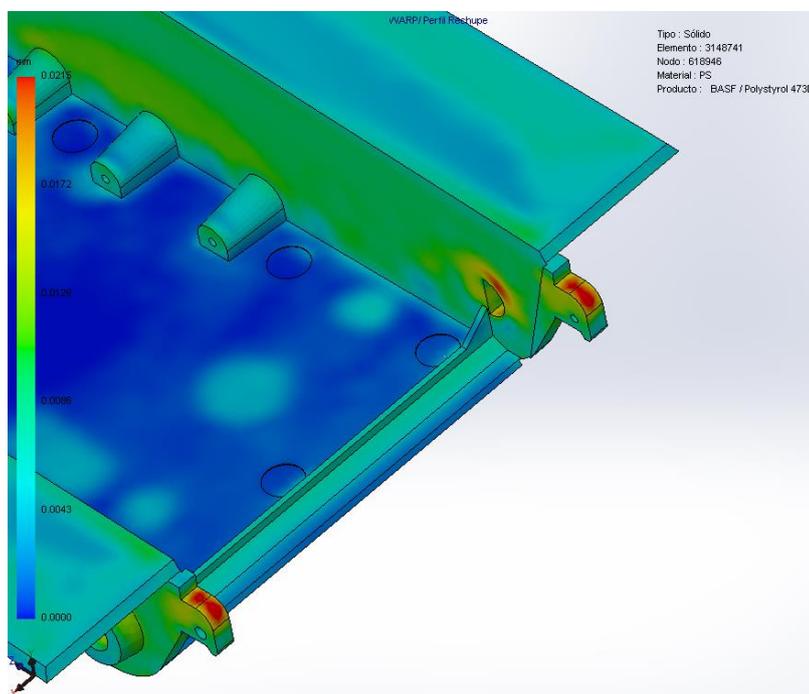


Figura 7.46: Detalle de los rechupes. Pieza.

Afortunadamente, tal y como se muestra en la figura 7.27, El desplazamiento en las zonas más propensas a sufrir rechupes, este valor es del orden de 0,02mm lo cual resulta bastante ínfimo.

## 7.5. Refrigeración.

Temperatura del material	240 °C
Temperatura mínima del refrigerante	25 °C
Temperatura de Aire	30 °C
Tiempo de Apertura Molde	5 sec
Flujo Medio Refrigerante	50 cc/s
Tipo de Control (1: Temp. de Eyección, 2:Tiempo de Refrigeración)	1
Temperatura de eyección (si el tipo de control es "1")	120 °C
Tiempo de refrigeración (si el tipo de control es "2")	6.35 sec

Tabla 7.9: Ajustes de refrigeración. Pieza.

Tiempo Medio de Refrigeración Pieza	3.04 sec
Temperatura Media Pieza	102.77 °C(216.98 °F)
Temperatura Media Cavidad Molde	42.94 °C(109.30 °F)
Transmisión de Calor Medio Cavidad Molde	-2.24 J/cm <sup>2</sup> -sec (-1.37e-002 Btu/in <sup>2</sup> -sec)
Carga Térmica Media Cavidad Molde	-20.76 J/cm <sup>2</sup> (-1.27e-001 Btu/in <sup>2</sup> )
Transmisión de Calor Medio Canales de Refrigeración	1.76 J/cm <sup>2</sup> -sec (1.08e-002 Kbtu/in <sup>2</sup> -sec)
Carga Térmica Media Canales de Refrigeración	16.37 J/cm <sup>2</sup> (1.00e-001 Btu/in <sup>2</sup> )
Intervalo Temperatura Pieza	37.62 ~ 237.45 °C( 99.71 ~ 459.41 °F)
Intervalo Temperatura Cavidad Molde	31.68 ~ 63.63 °C( 89.03 ~ 146.53 °F)

<b>Intervalo de transmisión térmica de cavidad de molde</b>	-7.85 ~ 1.09 J/cm <sup>2</sup> -sec( -0.05 ~ 0.01 Btu/in <sup>2</sup> -sec)
<b>Intervalo de carga térmica de cavidad de molde</b>	-72.95 ~ 10.12 J/cm <sup>2</sup> ( -0.45 ~ 0.06 Btu/in <sup>2</sup> )
<b>Intervalo de Transmisión de Calor Canales de Refrigeración</b>	-0.01 ~ 4.90 J/cm <sup>2</sup> -sec( -0.00 ~ 0.03 Btu/in <sup>2</sup> -sec)
<b>Intervalo Carga Térmica Canales de Refrigeración</b>	-0.07 ~ 45.54 J/cm <sup>2</sup> ( -0.00 ~ 0.28 Btu/in <sup>2</sup> )
<b>Tiempo de cálculo</b>	2191.36 sec

Tabla 7.10: Resumen de resultados de refrigeración. Pieza.

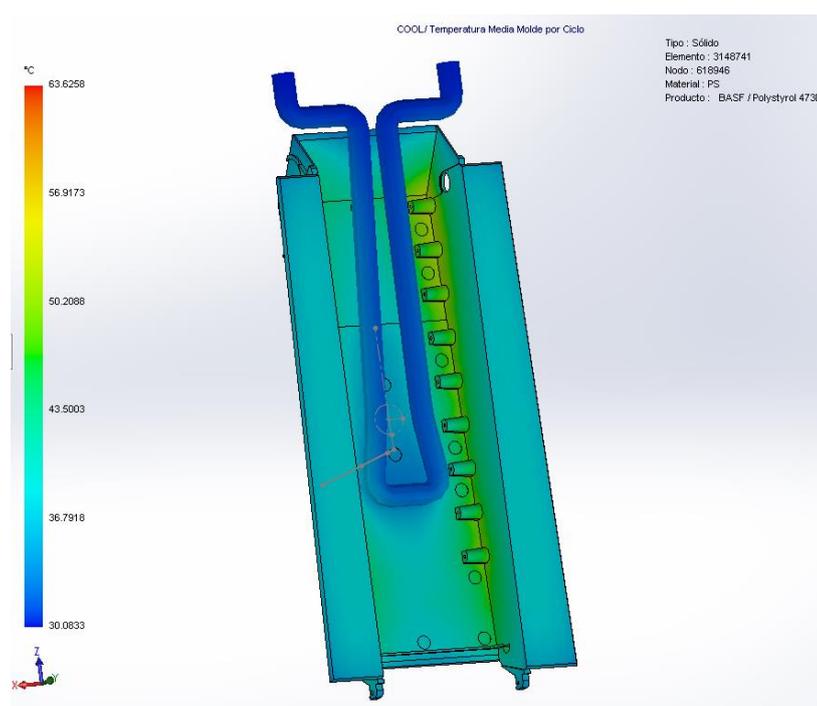


Figura 7.47: Temperatura media del molde por ciclo. Pieza.

Se ha optado por un sistema de refrigeración como el mostrado en la figura 7.28. Cabe matizar que Solidworks realiza su propia aproximación a partir del croquis proporcionado, por lo que éste no pasa los canales de refrigeración por dónde se le especifica que deben pasar. Además, no proporciona una aproximación de la calidad de refrigeración con el fin de determinar por dónde deberían circular los dichos canales. Como sí lo hace la herramienta de Software Moldflow.

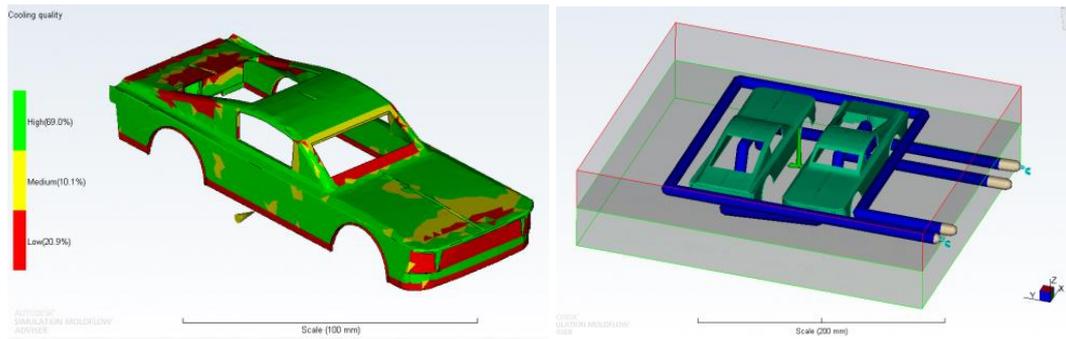


Figura 7.48: Ejemplo de calidad de refrigerado en Moldflow. (Fuente: wikifab).

Ante esta situación, todo lo que se podía hacer era determinar aquellos puntos donde el flujo es más caliente y refrigerarlos más rápido, asumiendo que la refrigeración era pobre.

### Carga térmica por ciclo de inyección.

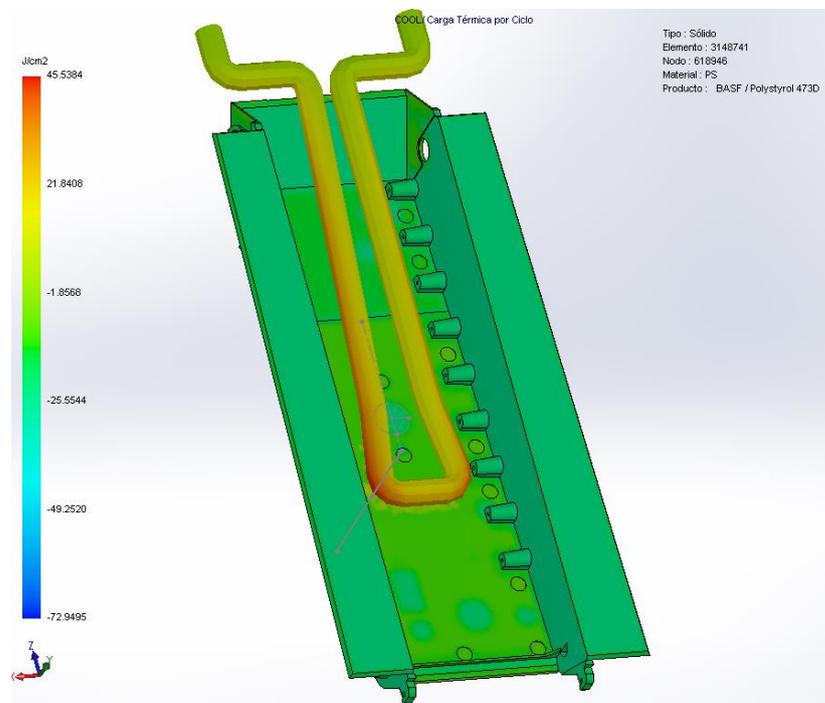


Figura 7.49: Carga térmica por ciclo. Pieza.

## 7.6. Estudio de resistencia del material.

Para que las piezas 20 y 20b encajen en su posición de ensamblado se requiere que se abran 0,25mm sin que se deformen. Por lo tanto, se ha decidido ejecutar un simple estudio con Solidworks Simulation.

Puesto que la librería de materiales disponibles no contiene nuestro material específico se ha seleccionado un poliestireno de alto impacto (HIPS) genérico.

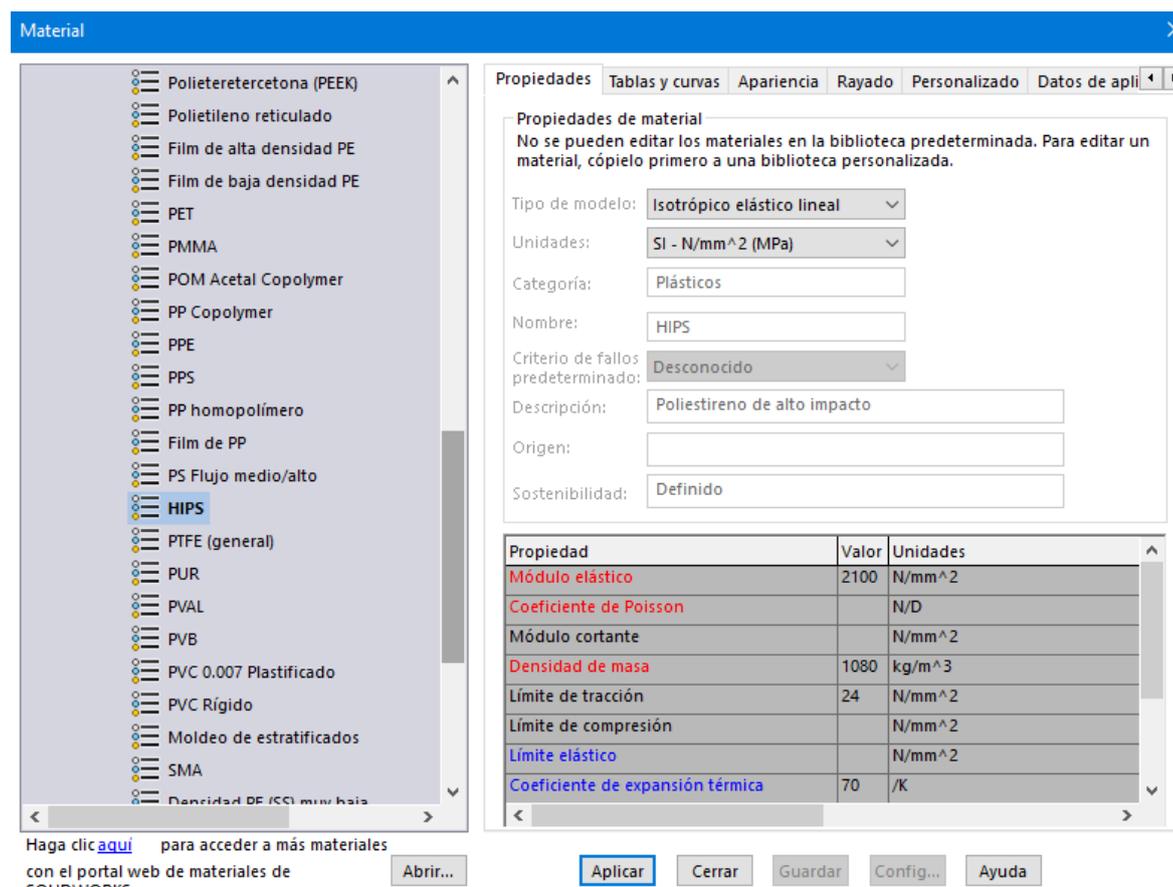


Figura 7.50: Propiedades del material en Solidworks Simulation.

Para que estas piezas se abran dicha distancia, se requieren de 0,5 N.

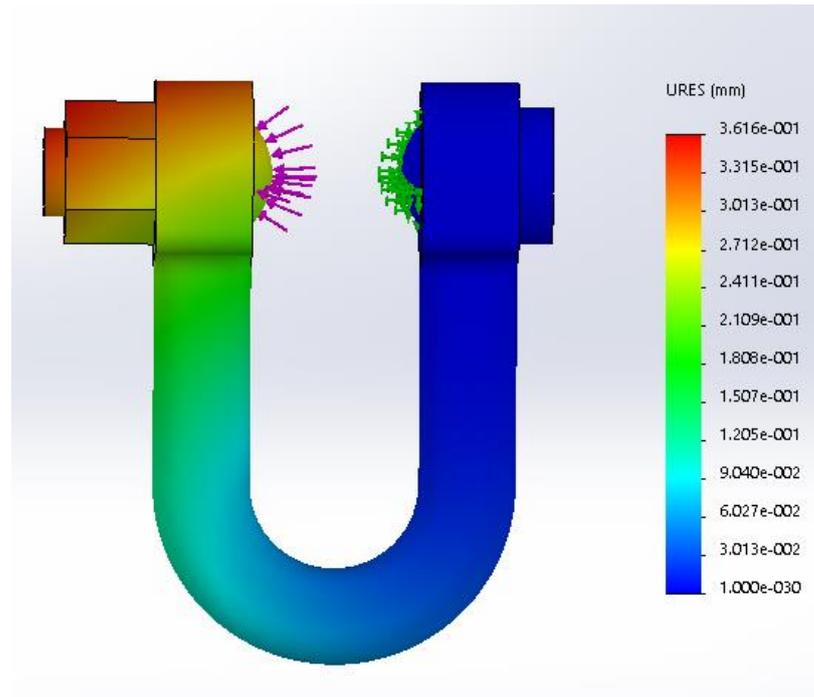


Figura 7.51: Desplazamientos. Pieza20b.

Finalmente, las tensiones de Von Mises revelan que no se ha sobrepasado el límite elástico en ninguno de los puntos, con lo que el material es válido para el montaje de la pieza.

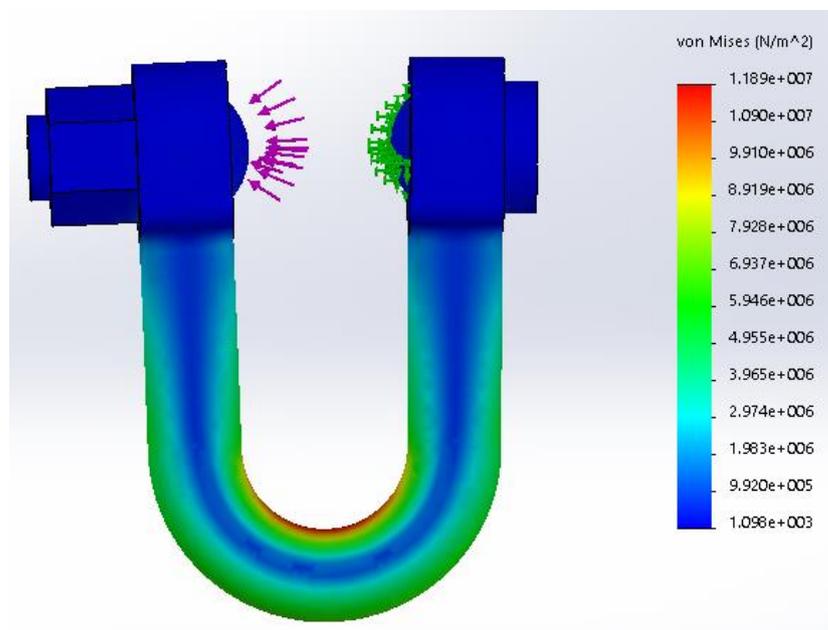


Figura 7.52: Tensiones de Von Mises. Pieza20b.

## 8. Análisis del impacto ambiental

El impacto ambiental del proceso de fabricación es prácticamente nulo, pues la inyección de plástico no contamina el ambiente de forma directa, no emite gases ni desechos acuosos, con bajos niveles de ruido. Ninguna avería de máquina tendría consecuencias catastróficas para el medio ambiente.

Siempre se puede mejorar, por lo que sería de interés realizar un estudio posterior para mejorar la eficiencia energética de la inyección y el mecanizado de los moldes.

Por lo que a los materiales se refiere, todos y cada uno de ellos se pueden reciclar:

- El poliestireno de alto impacto puede ser reciclado en cualquier punto limpio.



*Figura 8.1: Pictograma para el reciclaje del poliestireno de alto impacto.*

- Las virutas de acero P20 pueden ser vendidas para su reutilización como chatarra.
- El empaquetado de plástico y cartón pueden ser reciclados en cualquier punto verde. (Consúltense las ecotasas derivadas de este concepto en el apartado de presupuesto).

## Conclusiones

### Valoración personal.

A nivel personal, considero que éste trabajo me ha servido para aprender y consolidar todo lo referente al proceso de inyección de plástico. Si bien, el software escogido ha sido de todo menos amistoso en la realización de este trabajo. Ha demostrado ser bastante deficiente cuando se le exigía una determinada complejidad.

Escoger una temática que te gusta es esencial para desarrollar un proyecto de este calibre, de lo contrario es muy difícil encontrar energías que dedicarle al proyecto. Este trabajo me ha llevado al borde de la locura en determinados momentos donde nada salía como debería y si uno no tiene cuerpo y alma por el proyecto, hacer sacrificios... En resumen, tener vocación, no conseguirá seguir adelante.

### Objetivos alcanzados.

Una vez terminado el proyecto hay que hacer una retrospectiva y analizar los objetivos que se definieron al inicio de este trabajo.

El objetivo principal era realizar un presupuesto del tanque y de todo el proceso de fabricación.

Podemos concluir que éste objetivo se ha cumplido en mayor o menor medida gracias a los aspectos destacados a continuación.

- Diseñar cada una de las piezas, prestando atención para que sean desmoldables.
- Agrupar las piezas en matrices según compartan dirección de desmoldeo.
- Seleccionar los materiales de las piezas y los moldes.
- Determinar los costes de todo el proceso y establecer un PVP.
- El precio de venta del tanque es competitivo.
- La inversión inicial tiene una rentabilidad del 4,87% al tercer año.

## Bibliografía

- BASF, 2001. Processing Styrene Polymers and Copolymers by Injection Molding.
- Beltrán, M., y Marcilla, A., 2012. Tecnología de Polímeros.
- Boothroyd, G., Dewhurst, P., y Knight, W. A., 2010. Product Design for Manufacture and Assembly. Third Edition.
- Osprey Military, 1993. Carros de Combate, El Carro Pesado Königstiger.
- PLENCO, 2009. Consejos para el Diseño de Moldes de Inyección Termoendurecida.
- Whelan, T., y Goff, J. 1990. Injection Molding of Thermoplastic Materials.
- Elias, X., 2012. Métodos de valorización y tratamiento de residuos municipales.



## Índice de figuras.

Figura 2.1: Tanque Tiger II capturado por tropas americanas. (1944).

Figura 2.2: Varios ejemplos de coleccionismo con diferentes propósitos.

Figura 2.3: Tamiya Headquarters en Shizuoka, Japón.

Figura 2.4: Unboxing de un modelo a escala.

Figura 2.5: Ejemplo de interior y texturas.

Figura 3.1: Máquina de inyección con tornillo.

Figura 3.2: Secuencia de movimientos de una máquina de inyección convencional.

Figura 3.3: Máquina con tornillo preplastificador y pistón de inyección.

Figura 3.4: Duración relativa de las etapas del ciclo de inyección en una máquina convencional.

Figura 3.5: Posición en la que se determina la presión de inyección ( $P$ ), y la presión del sistema hidráulico ( $p$ ) que actúa sobre el tornillo.

Figura 3.6: Partes de un molde.

Figura 3.7: Ejemplo de línea de soldadura.

Figura 3.8: Ejemplo de rebabas.

Figura 3.9: Ejemplo de rechupes.

Figura 3.10: Ejemplo de vacantes.

Figura 3.11: Ejemplo de quemaduras.

Figura 3.12: Ejemplo de marcas originadas por el punto de inyección.

Figura 3.13: Ejemplo efecto Jetting.

Figura 3.14: Ejemplo stick-slip.

Figura 3.15: Ejemplo de llenado insuficiente.

Figura 3.16: Ejemplos de defectos de expulsión.

Figura 4.1: Planos montados sobre Solidworks.

Figura 4.2: Ejemplo de análisis del ángulo de salida.

Figura 4.3: Pieza con dirección de desmoldeo inválida.

Figura 4.4: Ejemplo de cara muerta corregida.

Figura 4.5: Ejemplo de ajuste.

Figura 4.6: Ejemplo de matriz.

Figura 4.7: Cavidades dispuestas en: a) Flujo equilibrado. b) Flujo compensado.

Figura 4.8: Detalle de las estrangulaciones.

Figura 5.1: respiradores directos sobre pieza.

Figura 5.2.: Esquema de un sistema de ventilación con cámara de vacío.

Figura 6.1: Piezas de Lego fabricadas en plástico ABS.

Figura 6.2: Ejemplo de simulación con ABS con dos inyectores y entrada directa.

Figura 6.3: Detalle de simulación con PVC con un punto de inyección y colada en derivación.

Figura 6.4: Detalle de especificación del material.

Figura 6.5: Marcas comerciales para HIPS.

Figura 6.6: Ejemplo de simulación con Lacqrene PS con un punto de inyección y colada en derivación.

Figura 7.1: Temperaturas de proceso para copolímeros de estireno.

Figura 7.2: Impacto instrumental del poliestireno de alto impacto frente a la presión de mantenimiento y la temperatura del molde.

Figura 7.3: Velocidad de giro recomendada del husillo como función del diámetro y velocidad lineal. (Fuente: BASF).

Figura 7.4: Diseños de toberas y bebederos.

Figura 7.5: Detalle del mallado sólido.

Figura 7.6: Tiempo de inyección. Pieza.

Figura 7.7: Detalle líneas de soldadura. Pieza.

Figura 7.8: Tiempo de inyección. Matriz.

Figura 7.9: Detalle del tiempo de cálculo en  $t=0,5337s$ . Matriz.

Figura 7.10. Generación de canales con la herramienta Solidworks Plastics.

Figura 7.11: Exclusión de los canales de colada.

Figura 7.12: Presión de inyección. Pieza.

Figura 7.13: Presión de inyección. Matriz.

Figura 7.14: Temperatura al final del llenado. Pieza.

Figura 7.15: Temperatura al final del llenado. Matriz.

Figura 7.16: Aumento de la temperatura al final del llenado. Pieza.

Figura 7.17: Aumento de la temperatura al final del llenado. Matriz.

Figura 7.18: Temperatura central del frente de flujo. Pieza.

Figura 7.19: Temperatura central del frente de flujo. Matriz.

Figura 7.20: Tasa de cizalla al final del llenado. Pieza.

Figura 7.21: Detalle de la tasa de cizalla en la estrangulación. Pieza.

Figura 7.22: Tasa de cizalla al final del llenado. Matriz.

Figura 7.23: Detalle de la tasa de cizalla en la estrangulación. Matriz.

Figura 7.24: Presión de ventilación. Pieza.

Figura 7.25: Presión de ventilación. Matriz.

Figura 7.26: Facilidad de llenado. Pieza.

Figura 7.27: Facilidad de llenado. Matriz.

Figura 7.28: Región solidificada al final de la etapa de inyección. Pieza. (En verde).

Figura 7.29: Región solidificada al final de la etapa de inyección. Matriz. (En verde).

Figura 7.30: Tiempo de refrigeración al final del llenado. Pieza.

Figura 7.31: Detalle del tiempo refrigeración de la puerta. Pieza.

Figura 7.32: Tiempo de refrigeración al final del llenado. Matriz.

Figura 7.33: Presión al final del empaquetado. Pieza.

Figura 7.34: Presión al final del empaquetado. Matriz.

Figura 7.35: Temperatura al final del empaquetado. Pieza.

Figura 7.36: Temperatura al final del empaquetado. Matriz.

Figura 7.37: Tensiones residuales al final del post-llenado. Pieza.

Figura 7.38: Tensiones residuales al final del post-llenado. Matriz.

Figura 7.39: Región Solidificada al final del post-llenado. Pieza. (En verde).

Figura 7.40: Región Solidificada al final del post-llenado. Matriz. (En verde).

Figura 7.41: Desplazamiento total. Pieza.

Figura 7.42: Desplazamiento total. Matriz.

Figura 7.43: Desplazamiento debido al efecto de las tensiones residuales. Pieza.

Figura 7.44: Desplazamiento debido a tensiones térmicas al enfriar. Pieza.

Figura 7.45: Rechupes. Pieza.

Figura 7.46: Detalle de los rechupes. Pieza.

Figura 7.47: Temperatura media del molde por ciclo. Pieza.

Figura 7.48: Ejemplo de calidad de refrigerado en Moldflow.

Figura 7.49: Carga térmica por ciclo. Pieza.

Figura 7.50: Propiedades del material en Solidworks Simulation.

Figura 7.51: Desplazamientos. Pieza20b.

Figura 7.52: Tensiones de Von Mises. Pieza20b.

Figura 8.1: Pictograma para el reciclaje del poliestireno de alto impacto.

## Índice de tablas y Gráficos.

Tabla 6.1: Propiedades Polystyrol 473D.

Tabla 7.1: Procesado de copolímeros de estireno.

Tabla 7.2: Descripción general. Pieza.

Tabla 7.3: Descripción general. Matriz.

Tabla 7.4: Ajustes de llenado. Pieza.

Tabla 7.5: Ajustes de llenado. Matriz.

Tabla 7.6: Resumen de resultados de flujo. Pieza.

Tabla 7.7: Resumen de resultados de flujo. Matriz.

Tabla 7.8: Ajustes del empaquetado. Pieza.

Tabla 7.9: Ajustes del empaquetado. Matriz.

Tabla 7.10: Resumen de resultados del empaquetado. Pieza.

Tabla 7.11: Resumen de resultados del empaquetado. Matriz.

Tabla 7.12: Ajustes de deformación: Pieza y Matriz.

Tabla 7.13: Resumen de resultados de deformación. Pieza.

Tabla 7.14: Resumen de resultados de deformación. Matriz.

Tabla 7.15: Ajustes de refrigeración. Pieza.

Tabla 7.17: Resumen de resultados de refrigeración. Pieza.

Gráfico 7.1: Flujo de entrada en función del tiempo. Pieza.

Gráfico 7.2: Flujo de entrada en función del tiempo. Matriz.

Gráfico 7.3: Presión máxima de inyección en función del tiempo de ciclo. Pieza.

Gráfico 7.4: Presión máxima de inyección en función del tiempo de ciclo. Matriz.

Gráfico 7.5: Fuerza de cierre en función del tiempo en la dirección X. Pieza.

Gráfico 7.6: Fuerza de cierre en función del tiempo en la dirección Y. Pieza.

Gráfico 7.7: Fuerza de cierre en función del tiempo en la dirección Z. Pieza.

Gráfico 7.8: Fuerza de cierre en función del tiempo en la dirección X. Matriz.

Gráfico 7.9: Fuerza de cierre en función del tiempo en la dirección Y. Matriz.

Gráfico 7.10: Fuerza de cierre en función del tiempo en la dirección Z. Matriz.