



ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA
INDUSTRIAL DE BILBAO



GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO FIN DE GRADO

2013 / 2014

*DISEÑO DE UN MOLDE DE INYECCIÓN DE UNA PIEZA
PLÁSTICA*

3. CÁLCULOS

DATOS DE LA ALUMNA O DEL ALUMNO

NOMBRE: JANIRE

APELLIDOS: FERNÁNDEZ BARROSO

FDO.:

FECHA: 05/06/2014

DATOS DEL DIRECTOR O DE LA DIRECTORA

NOMBRE: ROBERTO

APELLIDOS: LOBATO GONZÁLEZ

DEPARTAMENTO: TALLER MECÁNICO

FDO.:

FECHA: 19/06/2014

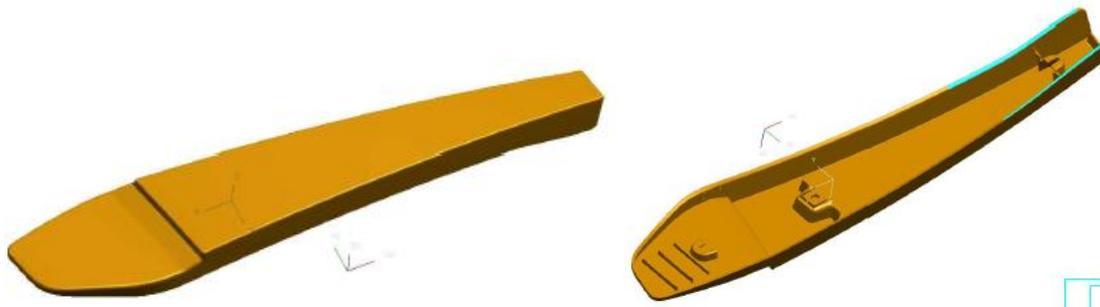
ÍNDICE

3.1. DATOS DE PARTIDA.....	3
3.1.1 DATOS DE LA PIEZA.....	3
3.1.2 DATOS DEL MATERIAL.....	3
3.2. CÁLCULO DE LA FUERZA DE CIERRE.....	4
3.3. CÁLCULO DEL CONO DEL BEBEDERO.....	6
3.4. ENFRIAMIENTO.....	7
3.4.1. CÁLCULO DEL TIEMPO DE ENFRIAMIENTO.....	7
3.4.2. CÁLCULO DEL CALOR QUE DEBE ELIMINARSE.....	8
3.4.3. DETERMINACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS CANALES DE ENFRIAMIENTO.....	9
3.4.4. DETERMINACIÓN DEL SISTEMA DE CÁMARA CALIENTE....	10
3.5. RESISTENCIA DE LOS EXPULSORES A PANDEO.....	13
3.6. OTROS CÁLCULOS.....	14
3.6.1. TIEMPO DE LLENADO.....	14
3.6.2. VELOCIDAD MEDIA.....	15
3.6.3. ATRAPAMIENTOS DE AIRE.....	15
3.6.4. CONFIANZA DE LLENADO.....	16
3.6.6. ESTIMACIÓN DE RECHUPES.....	17

3.1. DATOS DE PARTIDA

3.1.1. DATOS DE LA PIEZA

Pieza cliente:



Volumen: **278867.88mm³**

Superficie de las piezas proyectadas sobre el plano de partición del molde:
47775.211 mm²

3.1.2. DATOS DEL MATERIAL

- Material a inyectar: PC LEXAN SLX 1432
- Contracción: 1.005
- Densidad de sólido: 1.2319gr/cm³
- Conductividad térmica: 0.227W/m °C (297°C)
- Capacidad calorífica específica: 1963 J/Kg-C (290°C)
- Temperatura adecuada del molde 70°C
- Temperatura procesado recomendada: 295°C
- Temperatura de desmoldeo: 120°C

Para el cálculo de la masa de plástico a inyectar en el molde, bastará con tomar el volumen de la pieza y la densidad del PC LEXAN SLX 1432 y multiplicarlo por el número de piezas que se inyectarán a la vez; el volumen de la mazarota se considera despreciable frente al de la pieza al igual que los canales de distribución:

$$M_{\text{pieza}} = V \cdot \rho \cdot n = 278,87(\text{cm}^3) \times 1.2319(\text{g/cm}^3) \times 2 = 687.08\text{gr}$$

3.2. CÁLCULO DE LA FUERZA DE CIERRE

Lo primero que debemos hacer a la hora de fabricar una pieza de plástico es conocer qué tipo de máquina, donde se va a inyectar el molde, debemos elegir.

Para seleccionar la máquina de inyección adecuada para un determinado molde es necesario comprobar numerosos factores de tipo técnico. Una técnica habitual es considerar la fuerza de cierre, y en todo caso el volumen de inyección y las dimensiones del molde.

Para un volumen como el de nuestra pieza $278,87\text{cm}^3$ es factible elaborar un molde multicavidades, ya que, no requerirá una máquina con un volumen máximo de inyección muy elevado. Se moldeará en moldes de 2 cavidades.

Para conocer la fuerza de cierre necesaria hay que calcular la fuerza expansiva que se produce en el molde.

Se denomina fuerza expansiva a la resultante de multiplicar la presión en el interior del molde por la proyección del área de la pieza en la dirección de la apertura o desmoldeo de la máquina. Se puede estimar con la siguiente fórmula:

$$F = P \cdot A$$

Donde:

P = Presión en el interior del molde

A = Superficie de las X piezas proyectadas sobre el plano de partición del molde

$$= A = 2 \text{ cavidades} \times \frac{1 \text{ m}^2}{10^6 \text{ mm}^2} = 0.0955 \text{ m}^2$$

En este caso se tendrá en cuenta la fuerza expansiva producida por las piezas.

Se establece que la presión de inyección, y en consecuencia, la presión que se produzca en el interior del molde, para los materiales termoplásticos como el policarbonato sea de un máximo de 125MPa.

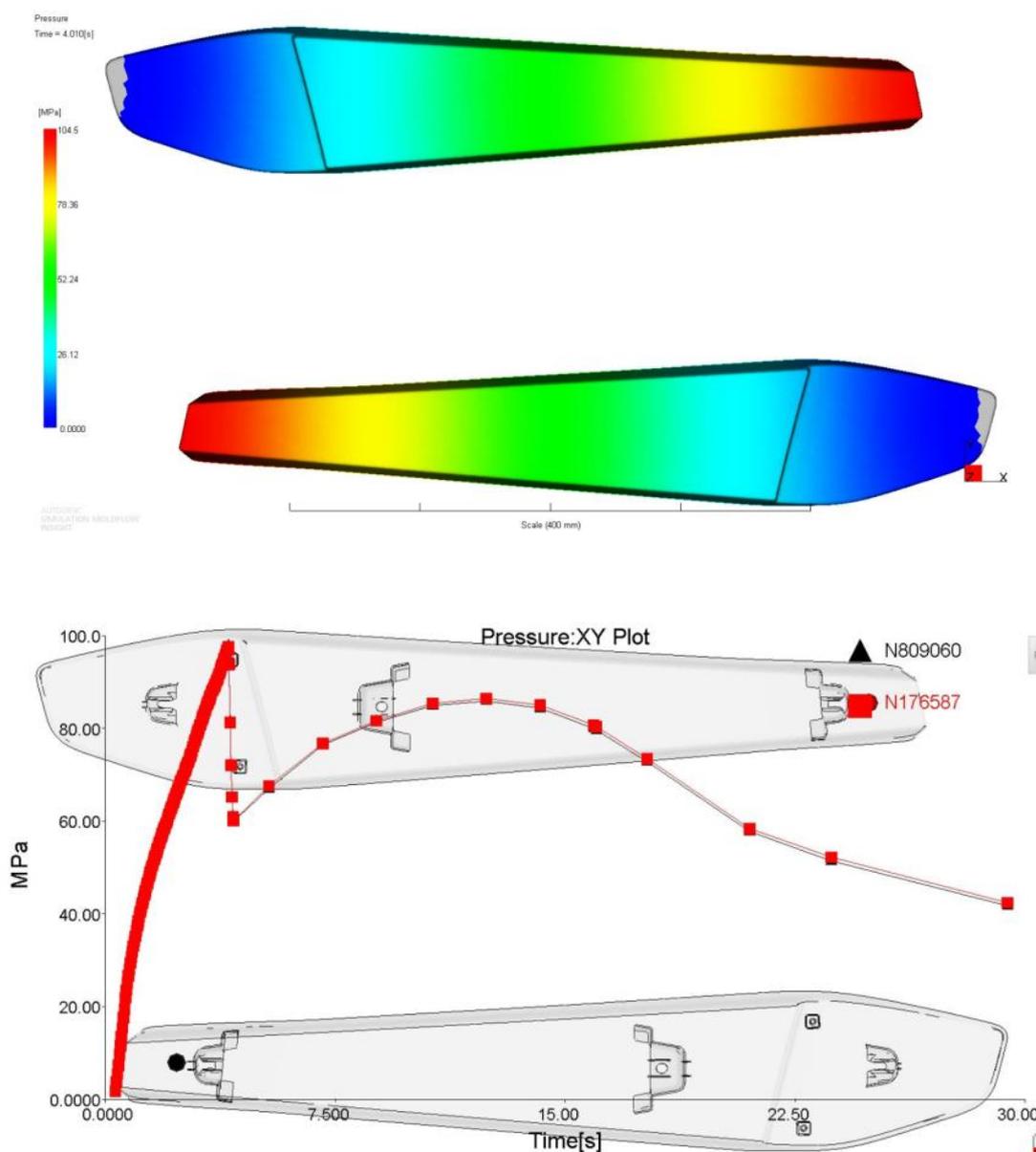
Mediante el moldflow hemos obtenido que la presión máxima se produce a los 4.01s y que tiene un valor de 104.5MPa.

Por tanto la fuerza expansiva obtenida rondaría en torno a:

$$F = 104.5 \times 10^6 \text{ Pa} \times 0.0955 \text{ m}^2 \times \frac{1 \text{ kg}}{9.81 \text{ N}} \times \frac{1 \text{ Tn}}{1000 \text{ kg}} = 1017.3 \text{ Tn}$$

Presión que a su vez no es uniforme y por tanto la fuerza de cierre de la máquina será aproximadamente de 1500Tn, para lo que utilizaremos la máquina E-1500.

Como ya se ha mencionado y explicado en la memoria, el apoyo informático del programa *Autodesk Simulation Moldflow Insight 2014* ha sido básico e imprescindible para todo este tipo de cálculos referentes a la inyección.



3.3. CÁLCULO DEL CONO DEL BEBEDERO

El diámetro menor del bebedero “d” ha de ser mayor que el diámetro de la boquilla de inyección del cilindro de plastificación. Esto habrá que tenerlo en cuenta en la elección del grupo de máquinas que mejor se adapten para inyectar la pieza. Por lo tanto, se selecciona un $d = 2.5\text{mm}$ definido por catálogo.

En la geometría de la pieza su espesor máximo ronda en torno a los 2.5mm , por lo tanto, el diámetro mayor del cono de colada “D” deberá tener un valor superior a estos 2.5mm .

Una conicidad “ α ” apropiada para el interior del bebedero es de 6 grados. Esta conicidad es suficiente para extraer con facilidad la mazarota del bebedero en el momento de la apertura del molde. Por tanto $\alpha = 6^\circ$.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, se puede hacer una aproximación de la longitud necesaria para el bebedero.

Es importante que el cono del bebedero no tenga una longitud “L” excesiva para que la mazarota sea lo más corta posible, evitando así agarres y no desperdiciando material plástico.

Las magnitudes que definen la geometría del cono del bebedero, están relacionadas matemáticamente mediante la siguiente fórmula:

$$L = \frac{D - d}{2} \times \frac{1}{\text{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

Probando con $D = 9\text{mm}$ se obtiene una longitud L de:

$$L = \frac{D-d}{2} \times \frac{1}{\text{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = 62\text{mm}$$

3.3 CÁLCULO DEL TIEMPO DE ENFRIAMIENTO Y DEL CALOR ELIMINADO.

3.4.1. CÁLCULO DEL TIEMPO DE ENFRIAMIENTO

Para el cálculo del tiempo de enfriamiento t_k se suelen utilizar las Leyes de Fourier, según las cuales:

$$t_k = \frac{s^2}{a \times \pi^2} \times \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \times \left(\frac{\sigma_M - \sigma_W}{\sigma_E - \sigma_W} \right) \right)$$

Donde:

- a =conductividad térmica / densidad del material por capacidad calorífica específica.

Donde: k =conductividad térmica = 0.227W/m °C

$$\rho = \text{densidad} = 1.2319 \frac{g}{cm^3} = 1231.9 \frac{kg}{m^3}$$

$$c_e = \text{calor específico} = 1963 \frac{J}{kg^\circ C}$$

$$a = \frac{k}{\rho \times c_e} = 9.3871 \times 10^{-8} \frac{m^2}{s}$$

- s = espesor de la pieza = 2.5mm
- σ_M = temperatura de elaboración = 295°C
- σ_W = temperatura de la pared del molde = 70°C
- σ_E = temperatura media de desmoldeo = 120°C

Por lo que obtenemos un tiempo de enfriamiento de:

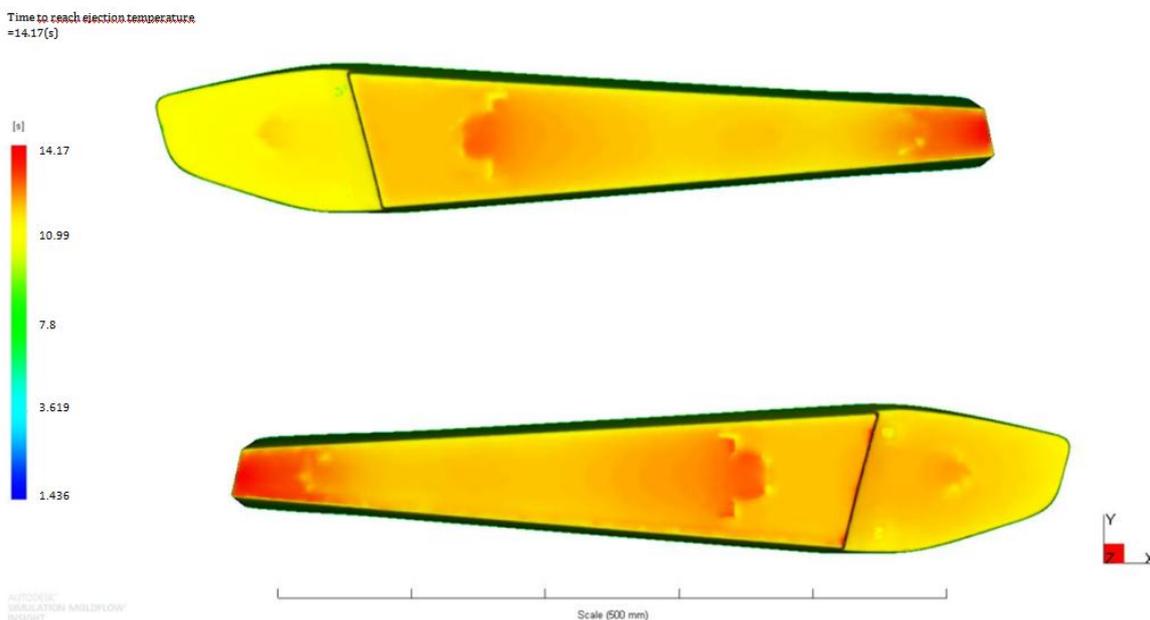
$$t_k = \frac{(2.5 \times 10^{-3})^2}{9.3817 \times 10^{-8} \times \pi^2} \times \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \times \left(\frac{295 - 70}{120 - 70} \right) \right) = 8.73s$$

Este tiempo es un valor aproximado, puesto que las variables usadas dependen de la temperatura, y ésta se supone constante.

Por otro lado el enfriamiento no debe ser excesivamente rápido, porque podría dar lugar a distorsiones de tipo interno. Con lo cual se acepta a priori el valor obtenido de la fórmula de Fourier para el enfriamiento.

Este tipo de cálculos para el enfriamiento son útiles sobre todo para placas y piezas de paredes finas, el espesor de la pieza en cuestión no alcanza el centímetro.

Decidimos comprobar este cálculo con el programa Mold Flow y vemos que el resultado obtenido es de 14.17s. Son resultados bastante aproximados pero por precaución escogeremos el obtenido con el soporte informático.



3.4.2. CÁLCULO DEL CALOR QUE DEBE ELIMINARSE

El calor que el molde debe disipar Q , depende de la masa de moldeo, de la temperatura de elaboración M y de la temperatura media E de desmoldeo.

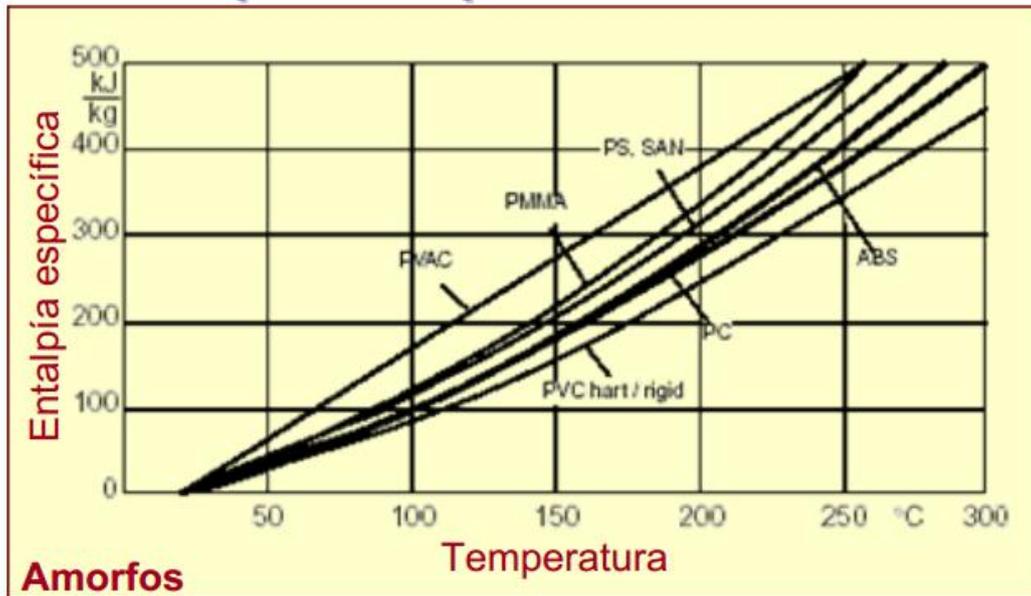
La fórmula que nos da su valor es:

$$Q = \frac{h_s \times m}{t_k} = \frac{115 \times 0.68708}{34.17} = 2.312 \text{ cal/s} = 9.656 \text{ J/s}$$

Donde:

- h_s = entalpía específica que se obtiene de las curvas para policarbonato
- m = masa de poliamida inyectada = 687.08gr = 0.68708kg

- t_k = tiempo enfriamiento = 34.17s



La cantidad de agua necesaria para poder disipar este calor es la siguiente, con una tolerancia de 2°C arriba o abajo:

$$m_{H_2O} = \frac{Q \times t_k}{C_{H_2O}} = \frac{9.656 \text{ J/s} \times 34.17 \text{ s}}{4.18 \text{ J/gr}} = 78.93 \text{ gr}$$

Donde:

- C_{H_2O} = calor específico del agua = 4.18 J/gr

Luego el caudal másico será:

$$Q_M = \frac{m_{H_2O}}{t_k} = \frac{78.93 \text{ g}}{34.17 \text{ s}} = 2.31 \text{ gr/s}$$

3.4.3. DETERMINACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS CANALES DE ENFRIAMIENTO

No se puede atribuir un espesor exacto en una geometría no lineal, con huecos... como la de la pieza; y dado que el tamaño de los diámetros D de los canales se recomienda en base al espesor de la pieza, se podría hacer una aproximación estimando un espesor a la pieza ***T de unos 2.5 mm.***

El diámetro de los canales por los que fluirá el líquido refrigerante es:

$$D = 10\text{mm}$$

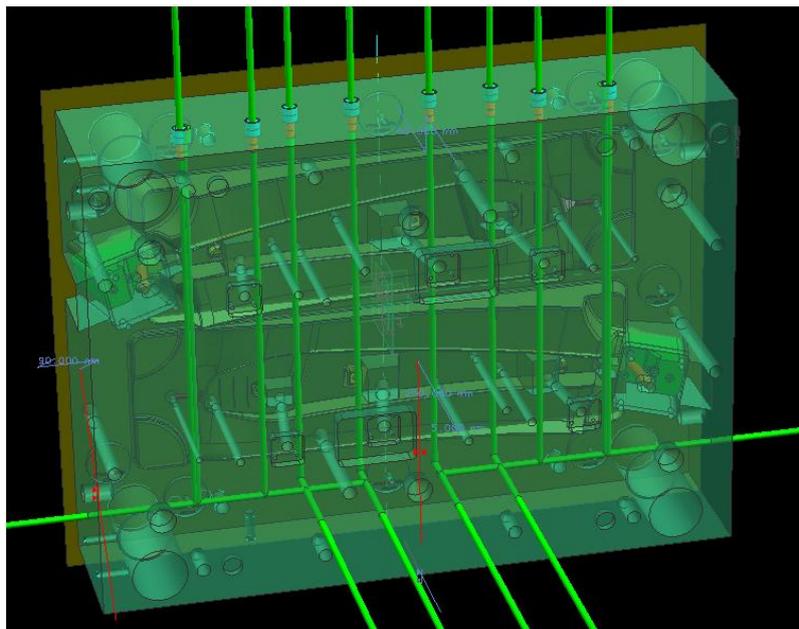
En cuanto a la distancia a la que se colocarán respecto de la pieza B , tanto referidos a la parte fija como a la móvil, puede ser de 2 a 3 veces D :

$$2 \cdot D \leq B \leq 3 \cdot D$$

La distancia adecuada a la que se colocan los canales para que refrigeren el material inyectado ronda en torno $B \gg 25\text{mm}$.

La distancia entre canales no debe exceder $6 \cdot D = 120\text{mm}$. Sin embargo, es inevitable que en algún instante se supere esta distancia, ya que, los canales de refrigeración no pueden atravesar o interferir en la geometría de la pieza, y existen una gran cantidad de expulsores.

La distancia entre canales, es de 120mm en el caso más desfavorable en la zona central, y de 76mm en la zona más favorable.



3.4.4. DETERMINACIÓN DEL SISTEMA DE CÁMARA CALIENTE

Los sistemas de canal caliente presentan una menor pérdida de presión respecto a moldes comparables con sistemas de distribuciones de solidificación. De esta forma, con sistemas de canal caliente se pueden inyectar piezas extremadamente grandes. Eliminando completamente el subdistribuidor de solidificación, se puede aprovechar mejor el volumen de una máquina de inyección. En este sentido se puede reducir el tiempo de llenado, lo cual significa una reducción del tiempo de ciclo.

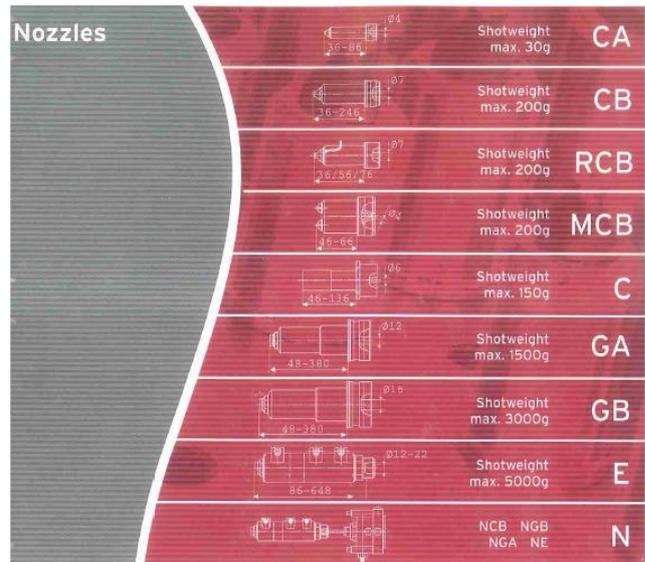
Para seleccionar el tipo de cámara caliente, debemos de tener en cuenta los siguientes datos de la pieza:

- Peso pieza: 687.08g
- Espesor: 2.5mm
- Nº cavidades: 2
- Material: PC LEXAN SLX 1432

Vamos a utilizar la marca SYNVENTIVE ya que ofrece en su catálogo una solución global que incluye todos los elementos necesarios para nuestro diseño.

La primera elección que debemos hacer es si utilizar o no válvula. La válvula se utiliza cuando se inyecta directamente a la pieza, ya que nuestra pieza tiene un pequeño bebedero y debido al elevado coste de las válvulas, desechamos esta opción.

Por lo tanto, seleccionamos el tipo de cámara “E-series. Nozzle”, con boquilla. Dentro del cual, tendremos un listado de boquillas a seleccionar:



Considerando el peso de nuestra pieza, la boquilla más adecuada para nosotros es “GA-series”, con un peso máximo de 1500gr.

Dentro de esta categoría, lo primero que debemos tener en cuenta es la boquilla más adecuada para un material en concreto, PC en nuestro caso:

	Semi-crystalline														Amorphous													
	Additives														Additives													
	PE	PP	PEEK	PPS	PBT	PPO/PA	PA	POM	PMMA	ABS	ASA	SAN	PS	PC/ABS	PC	PES	PSU	PPI	PVC	PPD	TPE							
GAWT	A	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
GAWT	A	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
GAWT	A	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
GAWT	A	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
GAWT	A	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
GAWN	A	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
GAWN	A	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
GAWN	A	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
GAWN	A	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○						

Index for additives

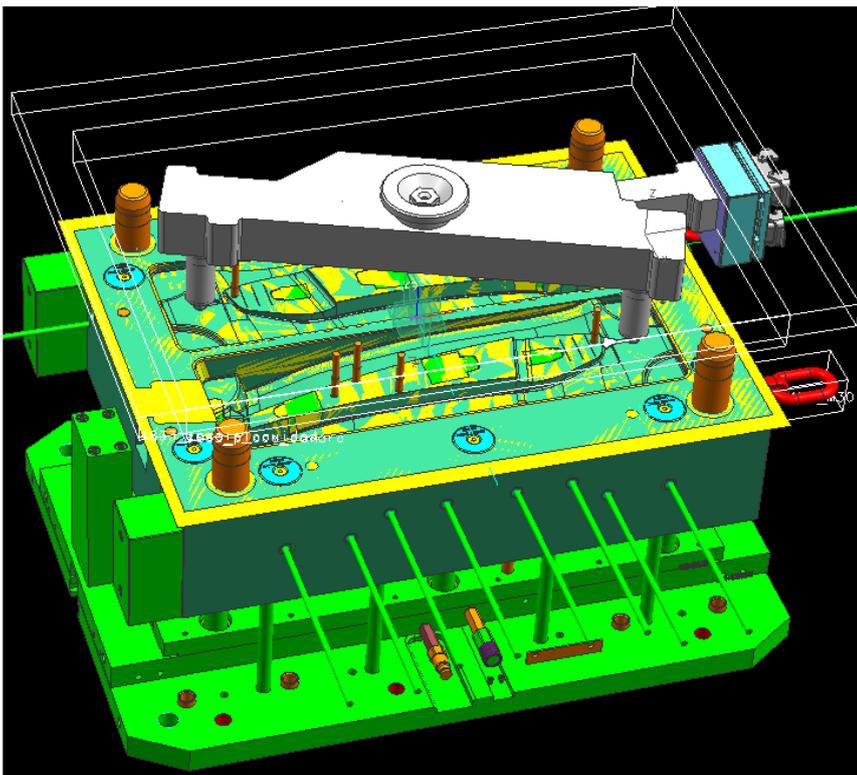
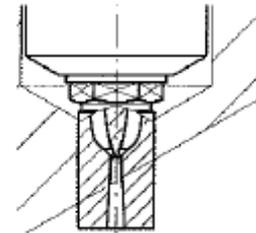
- A - none
- B - fillers
- C - glass fibre
- D - flame retardants

- very suitable
- suitable
- not suitable

Como vemos, el fabricante nos recomienda la utilización de los tipos de boquilla GAUT, GAST, GAWT, GAKN, GAUN y GASN.

Descartamos la boquilla GAKN por tener entrada directa al material y tardar mucho en enfriar, se suele utilizar para piezas pequeñas.

Vamos a seleccionar una boquilla con aguja, ya que este tipo hace que el material gotee menos. Además, las boquillas con longitud extra, tiene más control en la salida. Por lo tanto, seleccionaremos el tipo de boquilla GAST.

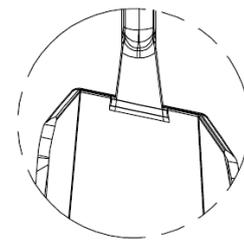


La cámara caliente tiene unos electrodos que aseguran que el material llegue a la misma temperatura a los dos puntos de inyección, que se encuentran separados a una distancia de 726mm.

PUNTO DE INYECCION



G-G
1:1



H
2:1

Los puntos de inyección, a su vez, tienen una disminución de sección para facilitar el corte en una etapa posterior a la inyección.

3.5. RESISTENCIA DE LOS EXPULSORES A PANDEO

Para calcular la carga crítica de los expulsores a pandeo se puede emplear la ecuación de una viga empotrada en la base y articulada en la cima debido a la disposición de los expulsores:

$$P_{crit} = \frac{20.19 \times E \times I}{L^2}$$

Donde:

- $E = 210\text{GPa}$ = Módulo de elasticidad del acero
- $I = \frac{\pi \times d^4}{32}$ = Momento de inercia del expulsor
- L = Longitud del expulsor = 500mm
- d = Diametro expulsor = 13mm

El momento de inercia es:

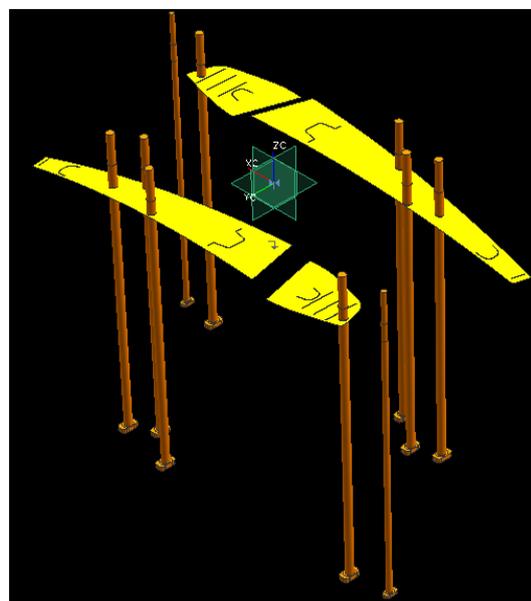
$$I = \frac{\pi \times 0.013^4}{32} = 2.8 \times 10^{-9} \text{m}^4$$

La carga crítica por tanto será de:

$$P_{crit} = \frac{20.19 \times 210 \times 10^9 \text{ N/m}^2 \times 2.8 \times 10^{-9} \text{m}^4}{0.5^2 \text{m}^2} = 47486,88 \text{N}$$

Los expulsores tienen diferentes longitudes pero para suprimir cálculos se ha optado por coger el expulsor más largo y hacer los cálculos con él, ya que, es el que más posibilidades tiene de sufrir pandeo.

Las longitudes de los expulsores no son exactamente las longitudes de pandeo. En el recorrido que realizan los expulsores para la extracción de la pieza del molde, éstos se ven guiados y enderezados por la placa portaexpulsora, por el inserto núcleo y



por su placa portacavidad. Este hecho favorece que las cargas críticas sean ligeramente superiores a las obtenidas anteriormente.

3.6. OTROS CÁLCULOS

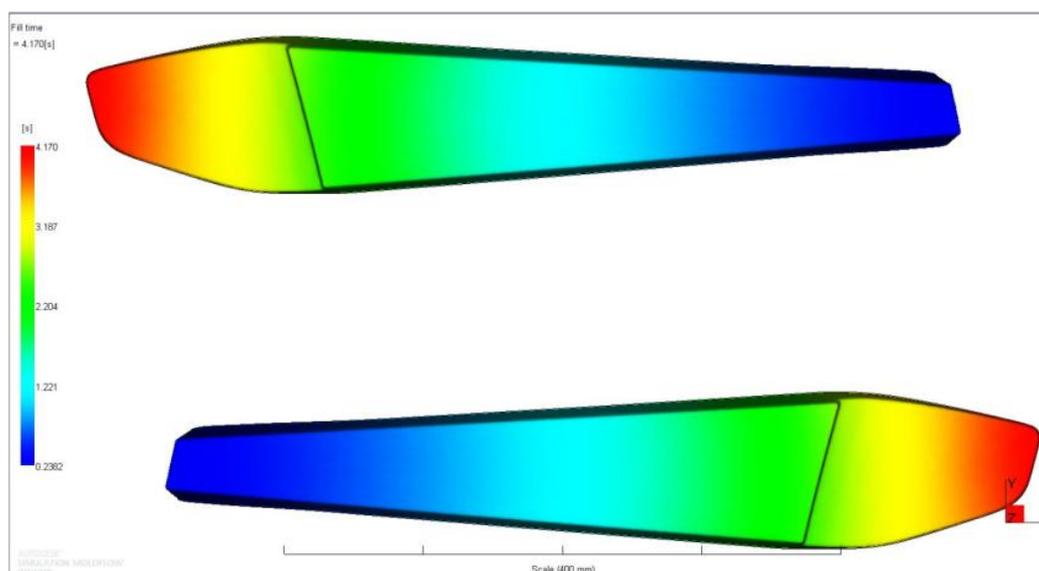
Como ya hemos comentado anteriormente el uso del programa Moldflow nos ha facilitado enormemente la obtención de elementos como la presión, fuerza de cierre o tiempo de enfriamiento.

Sin embargo si nos adentramos más en profundidad en las opciones que nos ofrece el programa podremos comprobar que nos permite obtener otros datos muy valiosos referentes al acabado del material, tiempos de llenado...

El programa nos ofrece la opción de generar un análisis con su posterior informe, a continuación veremos los datos más relevantes obtenidos para nuestra pieza.

3.6.1. TIEMPO DE LLENADO

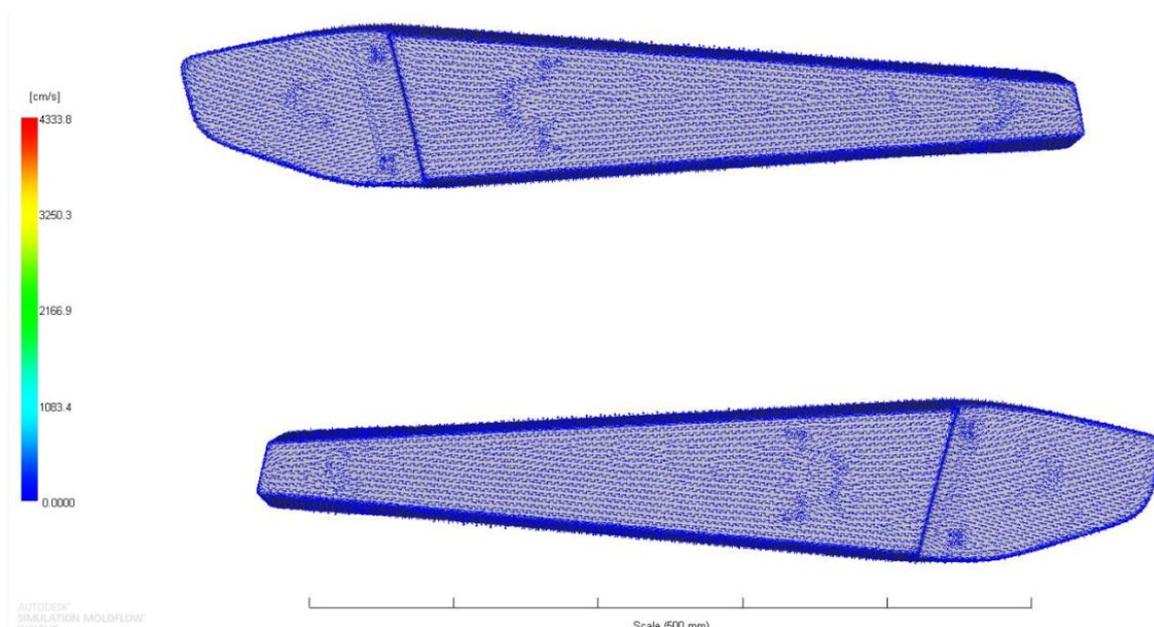
El tiempo de llenado es un dato crucial para diseñar correctamente el ciclo. Dado que nuestra pieza se fabricará en grandes cantidades un tiempo bajo de llenado es imprescindible para que el destinatario final del molde pueda ser competitivo en el mercado.



En nuestro caso veremos que el tiempo de llenado es de 4.17s, el cual es un tiempo aceptable.

3.6.2. VELOCIDAD MEDIA

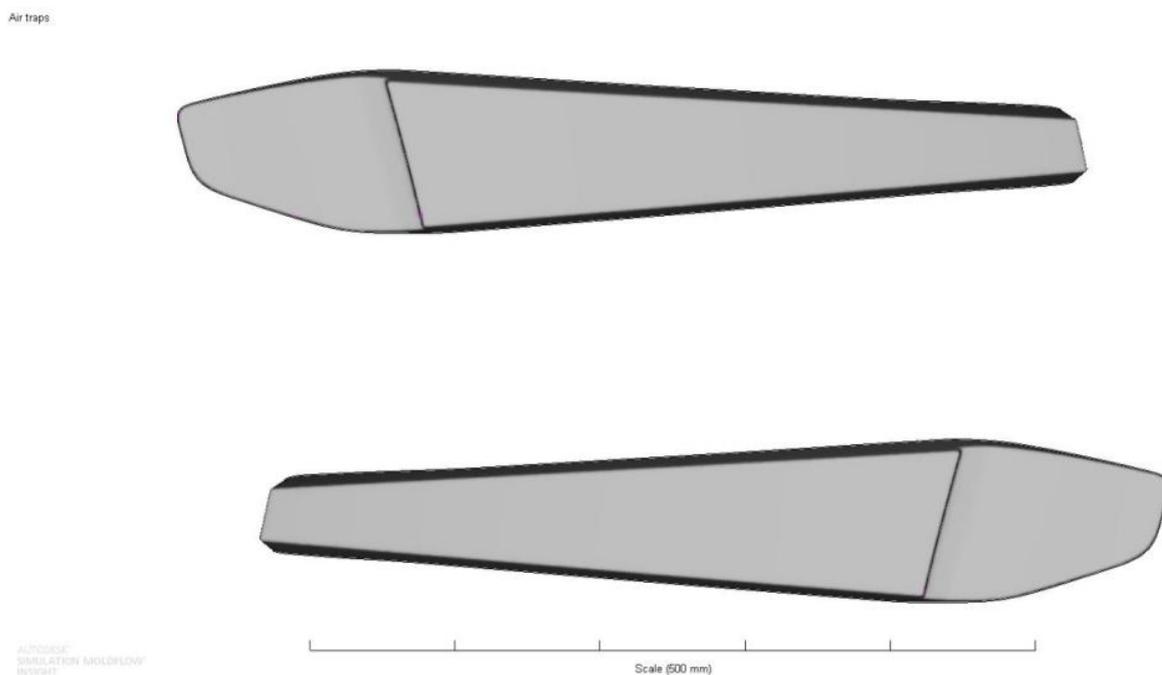
Otro dato interesante la velocidad media de llenado. No es conveniente una velocidad de llenado elevada ya que podría generar turbulencias pero tampoco una excesivamente lenta ya que el material se enfriaría y podría ocasionar obstrucciones o un llenado incorrecto de las cavidades.



En nuestra pieza el resultado fue de 4333.8cm/s.

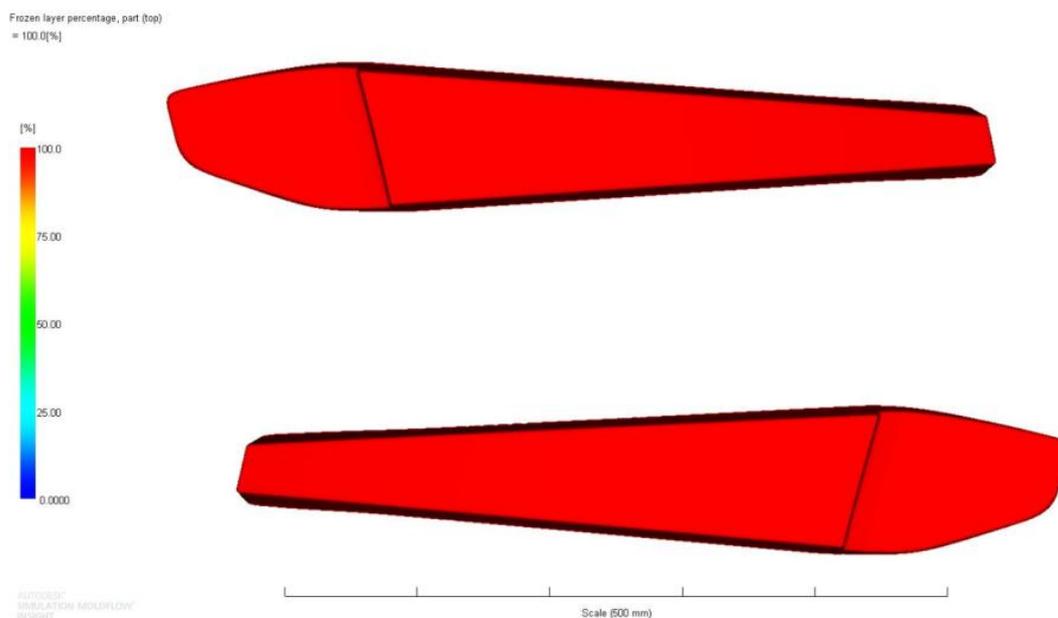
3.6.3. ATAPAMIENTOS DE AIRE

Como vemos en las imágenes facilitadas por el Moldflow, no se considera ningún atrapamiento de aire en el diseño de nuestra pieza.



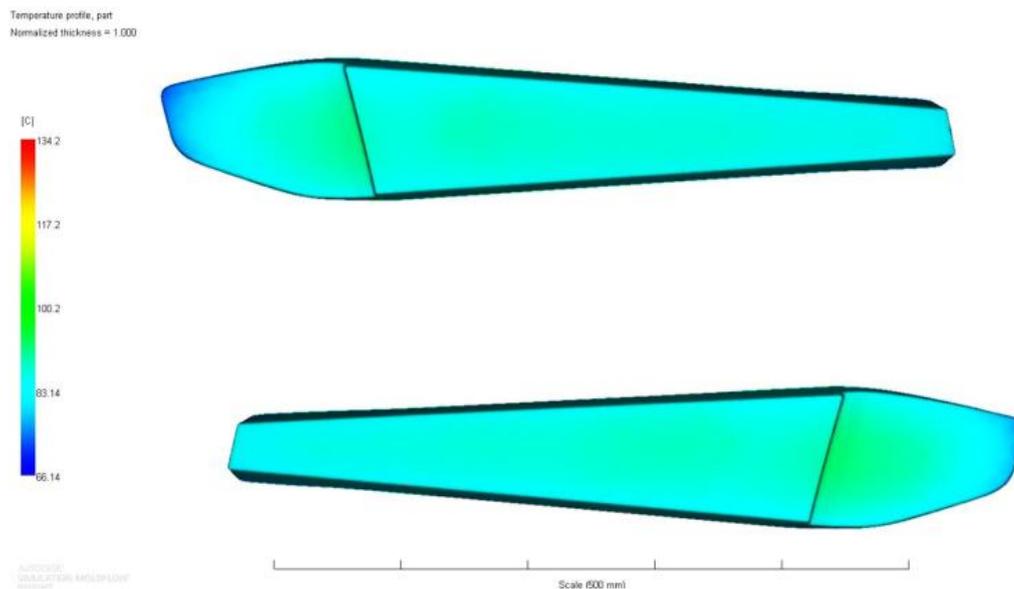
3.6.4. CONFIANZA DE LLENADO

Tras realizar el análisis de llenado el programa nos confirma que la confianza de de llenado es del 100% por lo que todas las zonas de la pieza recibirán el material correctamente. Esto es debido a un correcto dimensionamiento de los canales de distribución y a una presión adecuada.



3.6.5. CALIDAD DE REFRIGERACIÓN

Como vemos en la imagen, la pieza se refrigera uniformemente.



Esto se debe a haber distribuido los sistemas de refrigeración uniformemente por la pieza.

3.6.6. ESTIMACION DE RECHUPES

La pieza podría sacar rechupes pero solamente del 1.796% en el peor de los casos. Considerando el acabado de inyección de la pieza, policarbonato, no le daremos mayor importancia.

