



La importancia de la refrigeración del molde en el proceso de inyección de material plástico

FUNDACIÓN ASCAMM

Reproducido con autorización expresa del editor ©

1. Criterios generales

Frecuentemente, el diseño de la refrigeración de un molde de inyección, es una fase que queda en segundo plano para el proyectista y suele supeditarse al espacio que haya quedado libre una vez se han definido los alojamientos para la tornillería, el sistema de expulsión o cualquier otro elemento.

Este hábito durante el proyecto de molde, no da óptimos resultados, ya que no tiene en cuenta que la inyección de plásticos es un proceso térmico, y como tal tiene dos funciones prioritarias:

- Moldear el material inyectado
- Eliminar el calor aportado por el material fundido para que este solidifique.

El molde, además de moldear, enfría el material procedente del plastificador de la máquina de inyección, actuando de intercambiador térmico, de cuya eficacia depende el tiempo de ciclo de fabricación de la pieza y como consecuencia, el costo de ésta.

Vista la importancia de la eficacia del circuito de refrigeración, el diseño de la refrigeración del molde debe pasar a un primer plano y debe realizarse de forma que permita un enfriamiento óptimo de la pieza, definiendo los sistemas necesarios y mecanismos de expulsión adecuados que permitan mantener una circulación de refrigerante que garantice la máxima calidad de la pieza en el menor ciclo de inyección posible.

2. Introducción al proceso de inyección

La inyección de plásticos es un proceso cíclico y productivo.

Para que dicho proceso sea realmente productivo es necesario que el número de piezas inyectadas por unidad de tiempo sea lo más elevada posible, sin mermar su calidad.

El parámetro que más directamente influye en el ciclo de inyección es el tiempo de enfriamiento de la pieza, que varía de forma proporcional al cuadrado del espesor de pared de la pieza y depende directamente de la eficacia del circuito de refrigeración.

2.1. Teoría de la inyección

Ciclo de inyección: etapas del proceso

El proceso de inyección, consta de las siguientes etapas:

1. Cierre del molde
2. Avance del carro del grupo plastificador
3. Inyección: 1º fase de llenado, 2º fase de mantenimiento de la presión
4. Tiempo de enfriamiento
5. Dosificación o carga de material a inyectar
6. Retroceso del carro del grupo plastificador
7. Apertura del molde
8. Expulsión de la pieza.

Una vez expulsada la pieza o piezas del molde, se repite el ciclo.

Determinación del tiempo de ciclo de inyección

Puede obtenerse el ciclo de inyección como la suma de los tiempos implicados en el proceso (Figura 1).

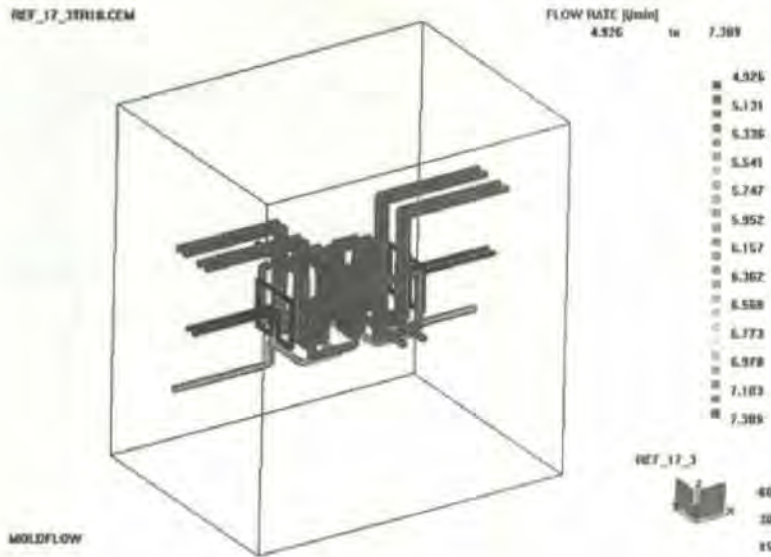


Figura 1. Distribución de los circuitos

- Equilibrado térmico de los circuitos
- Dimensionado adecuado en función del tamaño y del espesor de la pieza.

Un paso previo a la descripción de las distintas pautas es la correcta comprensión de los conceptos termodinámicos en que se basan cada una de ellas.

4. Introducción a la termodinámica

Para facilitar la comprensión de las pautas definidas que se explicarán a continuación, es necesario hacer una breve introducción a los conceptos termodinámicos básicos ya que ayudará a entender el motivo de su utilización.

Definiendo el calor como la energía acumulada por un material cuando éste aumenta de temperatura o bien como la energía liberada por un material cuando éste disminuye de temperatura.

Vemos pues que el calor puede ser absorbido o liberado. En nuestro caso, el calor es absorbido por el material plástico en la cámara de plastificación y el husillo, donde es calentado por las resistencias de calefacción y por fricción.

El calor es liberado al molde durante la refrigeración. Este calor liberado debe ser absorbido mediante el circuito de refrigeración ya que en caso contrario, el molde incrementaría su temperatura a cada ciclo y no conseguiríamos un proceso estable.

La capacidad calorífica se define como la cantidad de calor acumulado o cedido por una masa determinada de material.

La capacidad calorífica es, pues, proporcional a la masa, al calor específico y a la variación de temperatura del material.

$$Q = m c_e (t_{final} - t_{inicial})$$

Donde:

Q = Cantidad de calor
 c_e = Calor específico
 t = Temperatura

Se ha introducido un nuevo concepto: **calor específico**, que es la cantidad de calor que puede ceder o acumular un material por unidad de peso y grado.

Veremos que el calor específico de los tres elementos implicados en el molde plástico – metal – fluido refrigerante es muy distinto y como influyen en el proceso cada uno de ellos.

El calor puede transmitirse mediante tres mecanismos distintos:

- *Conducción:* Conducción es el paso de calor a través de un cuerpo, de molécula a molécula, sin desplazamiento visible de sus partículas
- *Convección:* Se conoce con este nombre el paso del calor en el interior de un gas o líquido, por mezcla de las porciones a distintas temperaturas
- *Radiación:* El calor transmitido de este modo no necesita de un medio material como vehículo. Un cuerpo caliente emite calor en todas direcciones, en forma de energía radiante.

En nuestro caso, consideraremos que la transmisión de calor se realiza por conducción.

Ecuación general de conducción

Según la ecuación básica de Fourier, la intensidad de paso del calor es proporcional a dos factores: al área A de sección normal al flujo y al gradiente de temperaturas con un factor de proporcionalidad que denominaremos conductividad calorífica definido como la cantidad

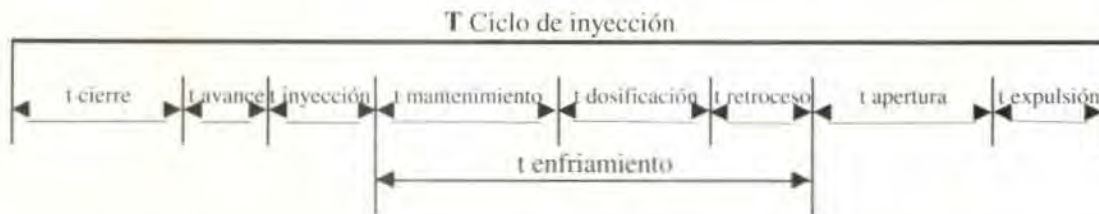


Figura1. Gráfico de desglose de los diferentes tiempos parciales que constituyen el tiempo de ciclo

$$T = t_{\text{cierre}} + t_{\text{avance de carro}} + t_{\text{inyección 1ª fase llenado}} + t_{\text{inyección 2 fase mantenimiento}} + t_{\text{enfriamiento}} + t_{\text{retroceso de carro}} + t_{\text{apertura}} + t_{\text{expulsión}}$$

Descripción:

- t_{cierre} : tiempo de cierre del molde
- t_{avance} : tiempo de avance del carro porta plastificador
- $t_{\text{inyección}}$: tiempo de inyección del material (1ª fase o llenado del molde)
- $t_{\text{mantenimiento}}$: tiempo de mantenimiento de la presión sobre el plástico o de segunda fase de inyección (para compensar la pérdida de volumen del material al enfriarse)
- $t_{\text{enfriamiento}}$: tiempo de enfriamiento de la pieza definido o necesario
- $t_{\text{dosificación}}$: tiempo de dosificación (nueva carga de material por rotación del husillo)
- $t_{\text{retroceso}}$: tiempo de retroceso del carro porta plastificador
- t_{apertura} : tiempo de apertura
- $t_{\text{expulsión}}$: tiempo de extracción de la pieza del molde y recuperación de los expulsores a su posición original.

La mayor o menor eficacia del circuito de refrigeración incrementa o disminuye el tiempo con un valor mayor y como consecuencia con un mayor efecto en el tiempo total del ciclo.

3. Criterios de diseño en función de la geometría de la pieza

En general, las prioridades a la hora de diseñar un molde son:

- Definición de la línea de partición
- Localización de las zonas que necesitan elementos móviles
- Definición del circuito de refrigeración
- Definición de la geometría de las partes móviles
- Diseño de los mecanismos de expulsión de la pieza.

Definición de la línea de partición

La salida de la pieza en un molde ha de estar diseñada de tal forma que su mecanismo sea lo más sencillo posible. Una vez conocida la geometría de la pieza, se debe definir la situación de la misma en el molde de forma que las zonas con negativos sean las mínimas posibles con el fin de reducir al máximo la necesidad de partes móviles en el molde.

Localización de las zonas que necesitan elementos móviles

Definida la colocación de la pieza en el molde y su partición, podemos observar en muchos casos, que partes de la geometría no tienen salida natural, es decir, están en negativo.

Para poder desmoldear estas zonas se necesitan elementos móviles que mediante un mecanismo (patín,

elevador, corredera hidráulica, corredera mecánica, etc.) separen la parte metálica que conforma la geometría generando un espacio suficiente para que la pieza pueda ser expulsada.

3.1 Definición del circuito de refrigeración

La definición del circuito de refrigeración se realiza siguiendo las pautas que se detallan a continuación:

- Circuitos ajustados a la geometría de la pieza
- La misma superficie de refrigeración en cavidad que en punzón
- División de circuitos en las zonas donde se prevean problemas de llenado, líneas de unión, etc.

de calor que permite pasar a su través un material por unidad de longitud, tiempo y grado y es específica de cada material.

A fin de simplificar conceptos y facilitar su comprensión supondremos que el sistema plástico – metal – fluido refrigerante se encuentra en estado estacionario por lo que la ecuación que lo regirá será:

$$Q = -kA (t_{\text{final}} - t_{\text{inicial}}) / x$$

Donde:

Q = Cantidad de calor transmitido por conducción

k = Conductividad calorífica

A = Área de transmisión de calor

t = Temperatura

x = Espesor del material

Es importante resaltar que a mayor superficie de intercambio y menor espesor, mayor transmisión de calor.

Hasta ahora se han introducido los conceptos y ecuaciones que definen lo que ocurre entre el plástico y el molde:

Calentamiento del material plástico y transmisión de este calor al molde por conducción

Un molde actúa como intercambiador de calor para permitir la eliminación del calor transmitido por el plástico al molde mediante el circuito de refrigeración y el refrigerante.

Un intercambiador de calor se define como todo dispositivo empleado para el calentamiento o enfriamiento.

El concepto fundamental que regula el intercambio de calor es el balance energético donde se define que el calor ganado por el fluido que enfría es igual al calor perdido por el material que se enfría.

Al actuar el circuito de refrigeración como intercambiador, la finalidad del mismo es:

Mantener la temperatura del molde constante.

En resumen:

- *La cantidad de calor a eliminar del molde dependerá del tamaño, grueso y del material de la pieza*
- *Para conseguir un mejor rendimiento térmico, los circuitos de refrigeración deben situarse lo más cerca posible de la superficie de la pieza y generando la mayor superficie de intercambio posible*
- *El circuito de refrigeración debe permitir el paso de suficiente fluido refrigerante con el fin de que la temperatura del molde sea estable.*

4.1. Ajuste a la superficie de la pieza

La transmisión de calor entre el material plástico y el molde se realiza básicamente por conducción.

En el apartado anterior la ecuación de la conducción nos definía que el paso de calor es inversamente proporcional a la distancia de separación entre la superficie de la pieza y el canal de refrigeración; como consecuencia, en el momento de definir la situación de los canales de refrigeración, éstos deben situarse lo más cerca posible de la superficie de figura.

En general, existe una distancia mínima entre el canal de refrigeración y la superficie de la pieza, que dependerá de dos factores:

- Medio de mecanizado utilizado
- Espesor de la pieza.

Medio de mecanizado

No es lo mismo mecanizar una refrigeración mediante taladros que mediante electroerosión, la diferencia estriba en la precisión del sistema de mecanización elegido.

Se han mencionado de forma intencionada los dos sistemas de mecanización con menor y mayor precisión respectivamente.

Aparentemente la mejor manera de mecanizar una refrigeración puede parecer la electroerosión, pero su economía en costo y tiempo hace que solo pueda ser utilizada en los casos en que no es viable la utilización de otro sistema.

La distancia entre los distintos canales de refrigeración debe ser la misma que entre el canal y la superficie de la pieza.

4.2. Igual superficie de refrigeración en cavidad que en punzón

La transmisión de calor pieza – molde es, básicamente, por conducción y esta, tal y como se ha expuesto anteriormente, es proporcional a la superficie de transmisión.

La transmisión de calor molde – refrigerante podemos simplificarla y asimilarla a básicamente por conducción y también es proporcional a la superficie de transmisión, como consecuencia, si la superficie de intercambio molde – refrigerante no es la misma en cavidad y punzón, la velocidad de refrigeración de la pieza no será la misma en toda su masa, provocando tensiones debidas a diferencias de contracción del material y deformaciones motivadas por estas tensiones.

Las tensiones generadas son debidas a que el material plástico cristaliza más (contrae más) cuanto más

tiempo permanezca a temperatura elevada.

No debe confundirse con que el molde esté a temperatura elevada, la cantidad de calor no es función de la temperatura, sino de la diferencia de temperaturas.

En algunos casos puede ser oportuno modificar la velocidad de transmisión de calor con el fin de generar tensiones que compensen las deformaciones en una pieza, con un circuito de refrigeración que tenga la misma superficie de intercambio en cavidad y punzón; esto es posible regulando el caudal de fluido refrigerante.

Equilibrar la transmisión de calor con superficies distintas no es tarea fácil sobre todo si no se conoce la relación entre las mismas.

Una herramienta predictiva que resulta muy útil para calcular y verificar el correcto equilibrado del circuito de refrigeración de un molde, es la simulación por sistemas reológicos C.A.E. (Computer Aided Engineering)

La simulación reológica de refrigeraciones es un análisis del intercambio de calor entre el fluido refrigerante o atemperante (usualmente agua), el molde y la pieza de plástico durante la fase de refrigeración del ciclo de inyección.

Tipos de análisis:

- Manual: Cálculo de temperaturas finales
- Automático: Cálculo del tiempo de refrigeración.

Resultados a obtener:

Los resultados básicos que se obtienen del análisis de refrigeraciones son:

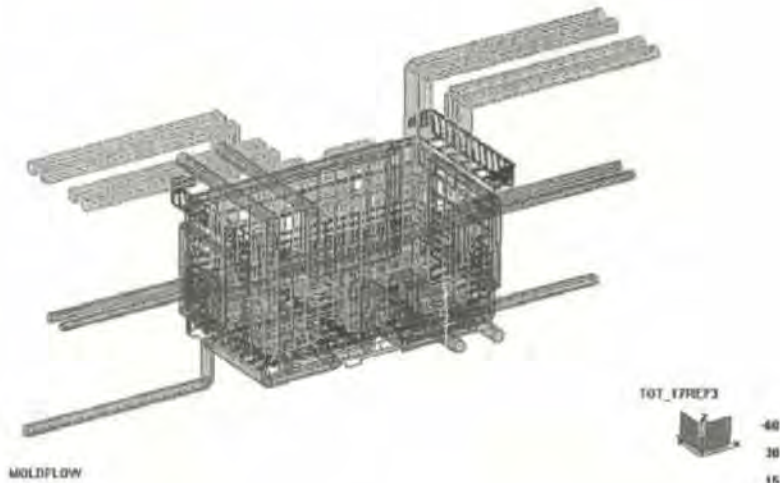


Figura 3. Cavidad y sistema de refrigeración del molde

- Temperaturas de la pieza y el molde
- Tiempo de enfriamiento (análisis automático)
- Grosor de la capa solidificada de plástico
- Número de Reynolds y caudal de la refrigeración
- Caída de presión en los circuitos de refrigeración.

Utilidad del análisis:

El análisis de refrigeraciones es una herramienta para el diseño y validación de los canales de refrigeración del molde. Permite calcular las temperaturas de la pieza y estimar el tiempo de enfriamiento necesario para expulsar la pieza.

Permite comprobar la efectividad y homogeneidad de un sistema de refrigeración. Es muy útil en consonancia con el análisis de deformaciones.

Datos necesarios para el análisis:

- Modelo mallado de la cavidad
- Modelo mallado de los canales de refrigeración y de las paredes exteriores del molde
- Datos del material
- Condiciones de contorno:
 - Material del molde y del atemperante
 - Temperatura del atemperante
 - Número de Reynolds o caudal
- Tiempo de apertura de cierre
- Tiempo de enfriamiento (análisis manual)
- Tiempo de compactación
- Porcentaje de plástico solidificado para la expulsión (automático)
- Temperatura de expulsión del material (opcional).

4.3. División de circuitos

En piezas de espesor variable, es necesario dividir los circuitos en tantas zonas como espesores tenga la pieza, ya que mediante la regulación de la temperatura de los mismos, se puede facilitar o dificultar el llenado optimizando el proceso de inyección.

En zonas donde se pueda producir líneas de unión, u otros problemas de inyección, la utilización de circuitos independientes permitirá garantizar el óptimo llenado de la pieza.

4.4. Equilibrado térmico

Se ha definido que la capacidad de disipación del refrigerante es proporcional a la masa de refrigerante, que se regula al variar el caudal, el calor específico del mismo (que se puede considerar constante), y la diferencia de temperatura. Así mismo se ha enunciado que la transmisión de calor por conducción es mayor cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre una cara, en nuestro caso la superficie de la cavidad y la otra que será la superficie del canal de refrigeración, es decir la diferencia de temperatura entre plástico y refrigerante debe ser la mayor posible, pero a la vez debe ser constante en toda la cavidad.

Este objetivo es difícil de cumplir si solo tenemos un circuito de refrigeración ya que el refrigerante se va calentando a medida que circula por el interior del circuito con lo cual la diferencia de temperatura disminuye y también la eficacia de la refrigeración. Para evitar que la diferencia de temperatura provoque contracciones diferentes en la pieza y como consecuencia, deformaciones en la misma, la mejor solución es dividir el circuito en varios sectores de forma que el incremento de temperatura en cada uno sea el mínimo necesario.

La utilización de un circuito único provoca que el molde esté a temperatura distinta en función del punto del circuito que le afecte, lo que también influirá en el llenado de la pieza debido a que el material fluirá mejor en las zonas más calientes y menos en las más frías generando tensiones de cizalla distintas que provocarán deformaciones en la pieza.

En el caso de moldes de varias cavidades también llamados multicavidad, éste fenómeno tiene gran importancia.

Generalmente al diseñar la colada en un molde de varias cavidades, ésta se diseña de forma que todas las cavidades llenen por un igual (equilibrado natural) y así evitar deformaciones por tensión, rebabas, etc.

Durante el desarrollo de un proyecto, se supone que todo el molde se encontrará a las mismas temperaturas cuando trabaje, pero esta pauta no se cumplirá si no se han calculado correctamente los circuitos de refrigeración de forma independiente para cada cavidad, ya que en caso contrario las cavidades más próximas a la salida del circuito estarán más calientes y el material plástico fluirá más, desequilibrando el llenado.

4.5. Tamaño del circuito en función de la geometría y tamaño de la pieza

El dimensionado del circuito de refrigeración debe ser el suficiente para garantizar la evacuación del calor aportado por el material plástico en el tiempo de enfriamiento definido como consecuencia del ciclo de inyección que debe cumplir el molde para ser homologado por el transformador. Para poder dimensionar el circuito primero se debe evaluar cual será la cantidad de calor aportado al sistema.

La cantidad de calor aportado será la masa de material plástico, que aproximaremos a su peso en gramos, por su calor específico que supondremos constante en todo el intervalo de temperatura y multiplicado por la diferencia de temperatura del material al entrar en la cavidad y la que tendrá la pieza en el momento de ser expulsada, de donde:

$$Q = m c_e (t_{final} - t_{inicial})$$

Siendo Q la cantidad de calor aportado al sistema.

Esta cantidad de calor debe ser eliminado por el fluido refrigerante y se transmite por conducción hasta la superficie del circuito por donde circula.

Para calcular la superficie del circuito, debemos aplicar la fórmula de la conducción de calor una vez definido el tiempo de enfriamiento del que disponemos para garantizar el ciclo de producción.

En general el cálculo debe realizarse como si el tiempo disponible fuera el 75% del necesario ya que de esta forma aseguramos el cumplimiento de nuestro objetivo.

La ecuación que regula la transmisión de calor por conducción es:

$$Q = -kA (t_{final} - t_{inicial}) / x$$

Donde k es el coeficiente de transmisión de calor por unidad de tiempo que depende del material utilizado para la construcción del molde.

La *temperatura inicial* será la temperatura a que se encuentre la cavidad del molde que podemos considerar constante y función del material a inyectar.

La *temperatura final* será la temperatura que se considera que debe tener el refrigerante durante el proceso de inyección como media.

La *x* es la distancia de separación entre la superficie de la cavidad y la superficie del circuito de refrigeración en el centro de su sección.

Q es la cantidad de calor a evacuar por unidad de tiempo por lo que debemos dividir el calor calculado anteriormente por el tiempo de refrigeración en segundos.

Despejando el área necesaria *A* de la ecuación obtendremos la superficie necesaria para garantizar la refrigeración en el tiempo previsto de la pieza.

Hay que tener en cuenta que solo la mitad de la superficie del canal de refrigeración es realmente eficaz si está debajo (o encima) de la superficie de la pieza. En cambio, si el canal está rodeado por pieza, la superficie de transmisión será su totalidad.

Despejando el área o superficie *A*:

$$A = (Q * x) / (T_{ciclo} * (-k * (t_{final} - t_{inicial})))$$

Una vez definida el área mínima necesaria para garantizar el ciclo, se procede a dimensionar el circuito de refrigeración.

El caudal necesario para garantizar la refrigeración de la pieza en el tiempo previsto, se calcula en función de la masa de fluido refrigerante que debe circular por unidad de tiempo con la misma fórmula que se ha utilizado para calcular la aportación de calor por parte del material.

Debido a que desconocemos la temperatura de salida del fluido refrigerante, una buena opción es suponer un caudal de 20 litros por minuto y comprobar a que temperatura saldrá el refrigerante. Si la diferencia de temperatura es superior a un grado centígrado, debemos rehacer el cálculo con un caudal mayor.

Este cálculo debe realizarse para cada sección del circuito de refrigeración.

Es evidente que realizar el cálculo de un circuito de refrigeración no es simple por lo que en general se suele recurrir a medios comparativos utilizando circuitos de piezas similares en que los moldes han funcionado de forma correcta.

En caso de no disponer de históricos suficientes, la mejor solución es, sin duda, utilizar la técnica C.A.E de simulación por ordenador mediante un programa reológico adecuado.

Área de Innovación y Desarrollo Tecnológico

Fundación ASCAMM
 Parc Tecnològic del Vallès
 Av. Universitat Autònoma, 23 E-08290
 Cerdanyola del Vallès (Barcelona) –
 España
 Tel. +(34) 93 594 47 00 Fax +(34) 93
 580 11 02 E-mail: inf@ascamm.es
 Web: www.ascamm.es

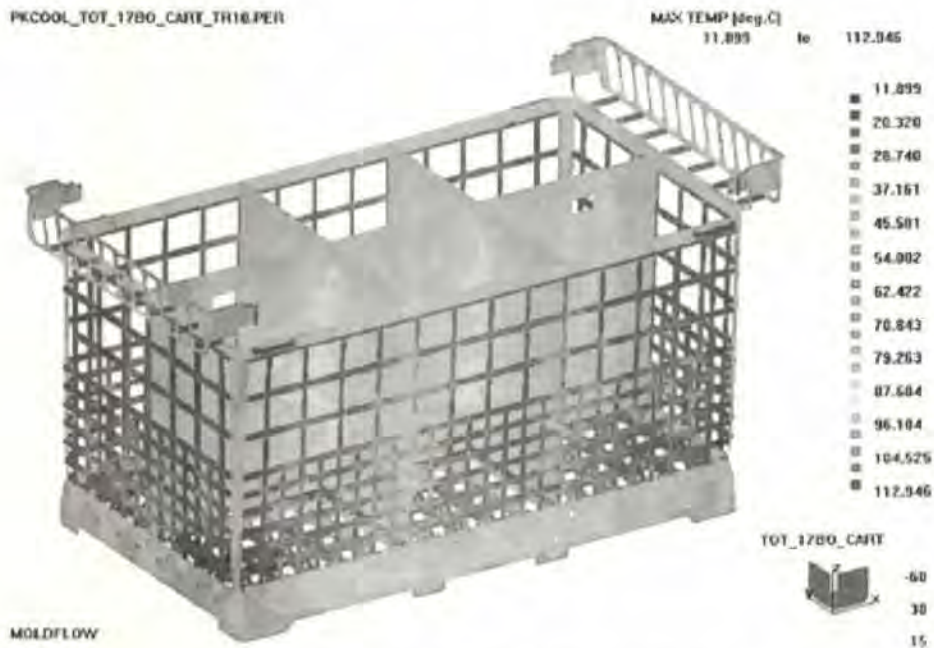


Figura 4. Distribución de temperaturas