



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

PUESTA A PUNTO Y OPTIMIZACIÓN DE UN MOLDE DE INYECCIÓN DE PLÁSTICOS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA VARIO THERM CON EL OBJETIVO DE SU INDUSTRIALIZACIÓN PARA DIAGNÓSTICOS MÉDICOS.

SET-UP AND OPTIMIZATION OF A PLASTIC INJECTION MOLD THROUGH THE APPLICATION OF VARIO THERM TECHNOLOGY WITH THE AIM OF ITS INDUSTRIALIZATION FOR MEDICAL DIAGNOSTICS.

Autor

JAVIER FORNOS ROYO

Director

MIGUEL ÁNGEL SIMÓN LISO

Ponente

JORGE AÍSA ARENAZ

Facultad / Escuela

Escuela de ingeniería y arquitectura, Universidad de Zaragoza, 2021

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, a los que les debo todo, por confiar siempre en mí, hayan ido bien o mal las cosas. Por enseñarme a no rendirme nunca, porque nada es imposible para el que nunca se rinde.

A mi hermano, por su esfuerzo de superación día a día.

A mis abuelos Higinio, Asunción y Rafael, que en paz descansen, que seguro que ahora estarían muy orgullosos de mí, y a mi abuela Silveria, que no para de preguntarme y preocuparse por lo que hago.

A toda la gente de MYPA, por acogerme y tratarme tan bien desde el primer día que estuve allí, en especial a Michel, que es con quien más momentos compartí.

A Jorge Aísa, por ayudarme con este trabajo y hacer que sea mucho mejor de lo que me imaginaba.

A todos mis amigos que me han acompañado durante todo este trayecto largo y complicado, pero que siempre me quedaré con lo positivo.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
1.1 OBJETO Y ALCANCE DEL TRABAJO: INTERÉS DE LA MICROFLUÍDICA	3
1.2 METODOLOGÍA.....	4
2. INTRODUCCIÓN A LA MICROINYECCIÓN	5
2.1 INTRODUCCIÓN A LA INYECCIÓN DE PLÁSTICOS CONVENCIONAL.....	5
2.2 INTRODUCCIÓN A LA MICROINYECCIÓN/MICROFLUÍDICA Y DIFERENCIAS RESPECTO A LA INYECCIÓN CONVENCIONAL	8
2.3 TECNOLOGÍA VARIO THERM EN LA MICROINYECCIÓN DE PLÁSTICOS.....	10
3. MATERIAL Y MÉTODO DE ESTUDIO	15
3.1 POSIBLES MATERIALES A UTILIZAR Y MATERIAL ELEGIDO.....	15
3.2 DESCRIPCIÓN DE UN MOLDE DE INYECCIÓN DE PLÁSTICOS.....	19
3.2.1 MOLDE EMPLEADO PARA LA FABRICACIÓN DE LA PIEZA (PACHINKO).....	23
3.3 MÁQUINA DE INYECCIÓN EMPLEADA	28
3.4 DISEÑO DE LA PIEZA Y ESPECIFICACIONES A CONSEGUIR.....	30
4. ENSAYOS Y RESULTADOS OBTENIDOS.....	35
4.1 PRUEBAS DE MOLDE Y RESULTADOS OBTENIDOS	35
4.2 ESTIMACIÓN DE COSTES DE FABRICACIÓN	55
5. RESUMEN, CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO.....	62
6. BIBLIOGRAFÍA	63
7. ANEXOS.....	65
ANEXO I: SIMULACIÓN DEL LLENADO DE LA PIEZA	65
ANEXO II: MICROSCOPIO OLYMPUS BX53.....	73
ANEXO III: HOJAS DE CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL COC TOPAS 6013.....	75

1. INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETO Y ALCANCE DEL TRABAJO: INTERÉS DE LA MICROFLUÍDICA

El proyecto en cuestión, llamado HoliFAB, se basa en el desarrollo de un dispositivo microfluídico realizado mediante inyección de plásticos. Las principales aplicaciones de este tipo de dispositivos son médicas, por ejemplo, diagnósticos y ópticas, por ejemplo, lentes. Éste proyecto está siendo desarrollado por varias empresas de distintas partes de Europa. La empresa MYPA INYECCIÓN SL, es la encargada de la fabricación de este dispositivo, que corresponde a una parte importante de este proyecto (figura 1).



Fig 1. Proyecto europeo HoliFAB

El objetivo principal del trabajo es la fabricación correcta del dispositivo, mediante el proceso de moldeo por inyección de plásticos, para la fabricación e industrialización de piezas destinadas a la realización de diagnósticos médicos. Los principales problemas abordados en este proyecto son:

- La correcta aplicación de la tecnología Variotherm durante el proceso de inyección.
- Obtener una elevada transparencia en la pieza.
- Conseguir medidas muy precisas, del orden de micrómetros en algunas zonas de la pieza para realizar correctamente el diagnóstico.

Todas estas cuestiones se analizarán y explicarán en detalle durante el trabajo mediante la realización de distintos ensayos (pruebas de molde) y posterior análisis de los resultados.

El diagnóstico médico para el que va a estar destinada la pieza tiene como objetivo la detección de las células tumorales circulantes (**CTC**) en sangre, lo que proporciona información sobre cuán agresivo es el cáncer y la consiguiente potencialidad de desarrollar metástasis [1].

Las células tumorales circulantes pueden ser detectadas incluso antes que el tumor donde se originan, y a menudo persisten, tras extirpar el tumor. Por tanto la determinación de éstas ayudaría de forma crucial a estudiar aspectos fundamentales de la oncología. Para ello, se debe fabricar una pieza que sirva para este propósito.

La pieza a desarrollar tiene un inserto de níquel en la parte central (figura 2; rectángulo rojo). En esta zona de la pieza, donde se encuentran los huecos de unos quince micrómetros de profundidad, circula la sangre, donde deben depositarse las células para su detección. Para que las células, de unos seis micrómetros de grosor, se depositen en los huecos, estos deben ser llenados por el plástico lo máximo posible. Esta es la parte principal y más compleja del trabajo.

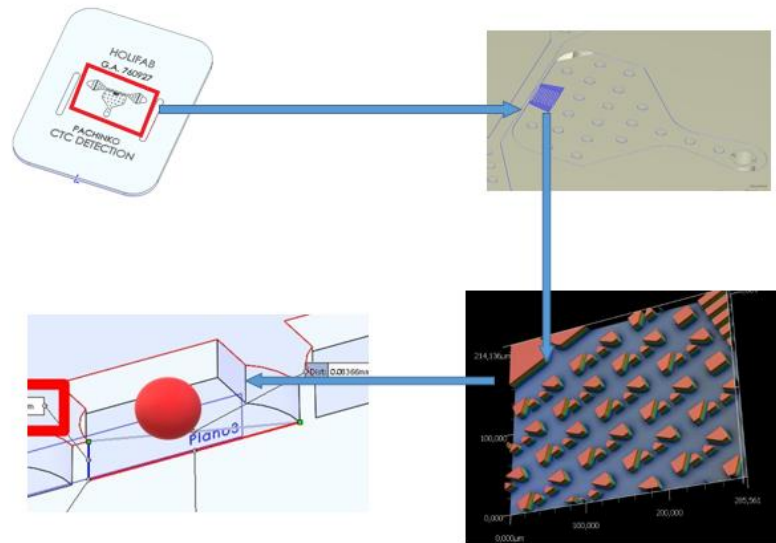


Fig 2. Pieza a desarrollar (PACHINKO) con inserto de níquel (rectángulo rojo) y forma de depositarse de las células. Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta estos objetivos, también se trabaja para el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) de la agenda 2030. En particular, se trabajará en pequeñas metas de los siguientes objetivos [2].

- **Objetivo 3:** Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades. En concretos los objetivos 3b y 3d.
- **Objetivo 9:** Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación. En concreto los objetivos 9.5 y 9b.

1.2 METODOLOGÍA

En cuanto a la metodología empleada en el trabajo, el proceso a seguir será el siguiente:

- Lectura e investigación sobre la inyección de plásticos, microinyección/microfluídica, tecnología Variotherm y su estado actual, posibles materiales a utilizar y máquina de inyección empleada mediante distintos recursos bibliográficos.
- Resumir y ordenar dicha información para que resulte clara y concreta, captando la atención del lector.
- Una vez realizada esta investigación, se realizarán distintas pruebas de molde (ensayos) con el objetivo de la documentación, toma de datos y posterior análisis de los resultados, justificando los cambios realizados en cada una de estas pruebas para el cumplimiento del objetivo deseado.
- Se realizarán medidas de la profundidad de llenado alcanzada en los huecos micrométricos del inserto tras la aplicación de la tecnología Variotherm y se compararán con la profundidad alcanzada sin el uso de esta tecnología, es decir, mediante inyección convencional.

2. INTRODUCCIÓN A LA MICROINYECCIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN A LA INYECCIÓN DE PLÁSTICOS CONVENCIONAL

El moldeo por inyección de plásticos es un proceso discontinuo que se repite de forma cíclica produciendo en serie piezas de material plástico con formas complejas y secciones variables. Este proceso consiste básicamente en partir de un polímero en forma de gránulos, se calienta hasta un estado fundido y se le hace fluir al interior de una o varias cavidades de un molde donde solidifica [3].

Para una correcta fabricación final, es imprescindible la integración de condicionantes de diseño de la pieza a fabricar (contrasalidas, espesores), material elegido para su fabricación (viscosidad, propiedades mecánicas, contracción), utillaje y máquina a utilizar (definición de molde, entradas, refrigeración, fuerza de cierre de la máquina) y puesta a punto del proceso (temperaturas, caudales, tiempos). Sobre estos elementos se volverá en el capítulo siguiente referido al caso estudiado en este trabajo fin de estudios.

Algunas de las ventajas de este proceso son la reproducibilidad de las piezas fabricadas, la flexibilidad de geometrías, la automatización del proceso y la posibilidad de obtener series altas en tiempos relativamente cortos. Las desventajas son, principalmente, los costes de mecanizado del molde, ya que éste tiene una fabricación muy compleja y, normalmente, se le tienen que hacer determinados retoques para su correcto funcionamiento y la dificultad para determinar los parámetros del proceso, ya que dependen del material que se vaya a utilizar y de las características del molde [3].

Por todas estas razones, se suele utilizar esta tecnología frente a otras relacionadas con fabricación en plástico cuando [3]:

- Se precisa una alta precisión, difícil de obtener sin el uso de presiones y tiempos de compactación para contrarrestar la contracción propia de los polímeros.
- El número de piezas a producir es elevado (10000 unidades o más) puesto que permite la amortización del utillaje o molde, costoso por sus prestaciones técnicas.
- Las formas son complejas o irrealizables por otros procesos (extrusión, soplado, rotomoldeo...etc).

A continuación, se explica el proceso de inyección de forma gráfica, separándolo en cada una de sus fases:

- **Proceso de inyección:**

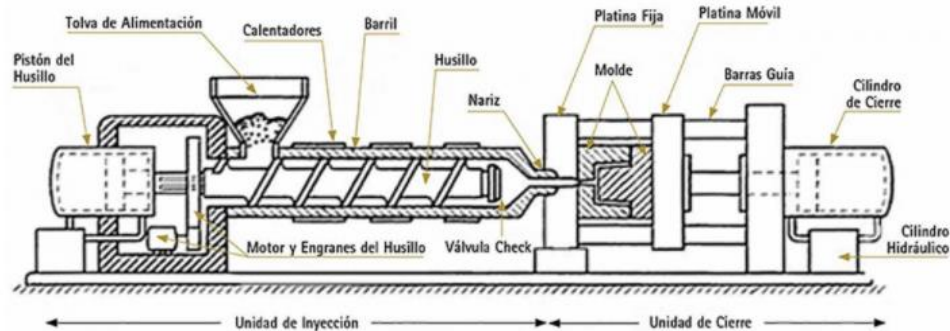


Fig 3. Partes de la unidad de inyección y cierre. Fuente: tomado de [4].

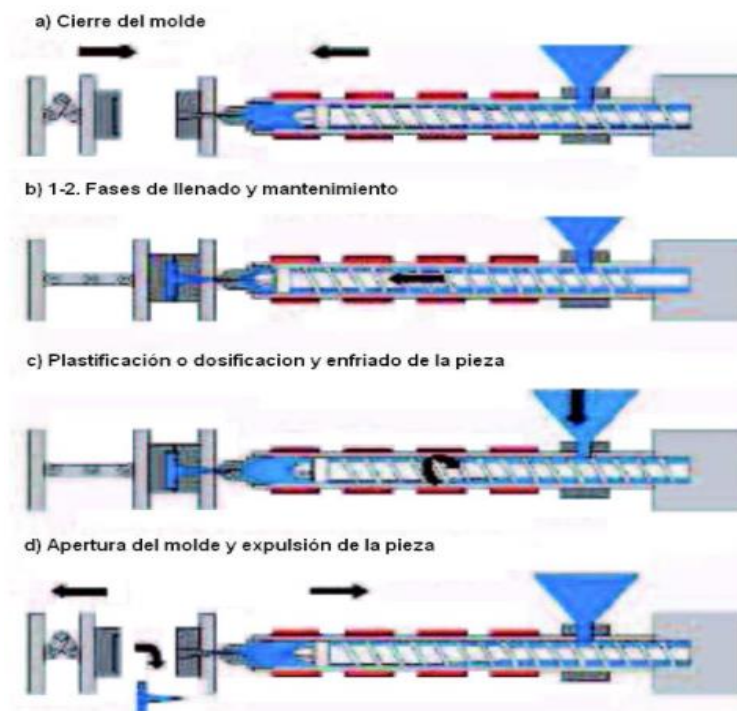


Fig 4. Fases del proceso de inyección. Fuente: tomado de [5].

Las fases del ciclo de moldeo (figura 4) son las siguientes [5]:

- **Cierre del molde:** La unidad de cierre se encarga de aproximar el plato móvil del molde hasta contactar con el lado fijo mediante la aplicación de una determinada fuerza de cierre, que dependerá de la máquina de inyección que se esté empleando. El sistema de accionamiento puede ser mecánico, hidráulico o mixto.

- **Llenado volumétrico:** La unidad de inyección transfiere un caudal de material fundido desde la cámara de plastificación al molde, apoyando la boquilla en el molde, con unas condiciones de temperatura determinadas. En esta etapa, se produce una variación de presión necesaria en cada instante, que aumenta durante el llenado hasta alcanzar el valor de presión requerido para llenarlo completamente. Esta fase termina cuando se llena casi por completo el molde, siendo el caudal de inyección el parámetro crítico, y en menor medida, la temperatura del material y del molde.
- **Compactación:** Cuando el material se ha introducido en el molde, se produce una disminución del volumen y una pérdida de la presión debido al enfriamiento del material que tiene lugar desde el momento en que el fundido contacta con las paredes. Esto se compensa con la introducción de nuevo material en el molde manteniendo la presión (parámetro a controlar). El objetivo es que la presión en toda la pieza sea la misma y, de este modo, se obtenga una pieza homogénea, con una distribución uniforme de densidad y propiedades. El otro parámetro importante es el tiempo que actúa la presión de mantenimiento. Es la fase que permite el control dimensional en inyección convencional.
- **Enfriamiento:** La pieza se enfría en el interior de la cavidad del molde hasta alcanzar la presión y temperatura adecuada para poder ser expulsada. El parámetro crucial sería el tiempo necesario para poder expulsar la pieza sólida, que varía sensiblemente con el espesor dado al producto.
- **Dosificación:** Sucede simultáneamente con el enfriamiento: mientras en el molde la pieza ya llena se enfría, la unidad de inyección plastifica y prepara la dosis siguiente para la próxima pieza. Los parámetros importantes en esta etapa son la velocidad de giro, la contrapresión y la temperatura a lo largo de la cámara de plastificación.
- **Apertura del molde y expulsión:** Cuando el plástico ha llegado a las condiciones de presión y temperatura, el molde se abre por la acción del sistema de cierre. En esta fase, los parámetros fijados son cotas, velocidades y presiones.

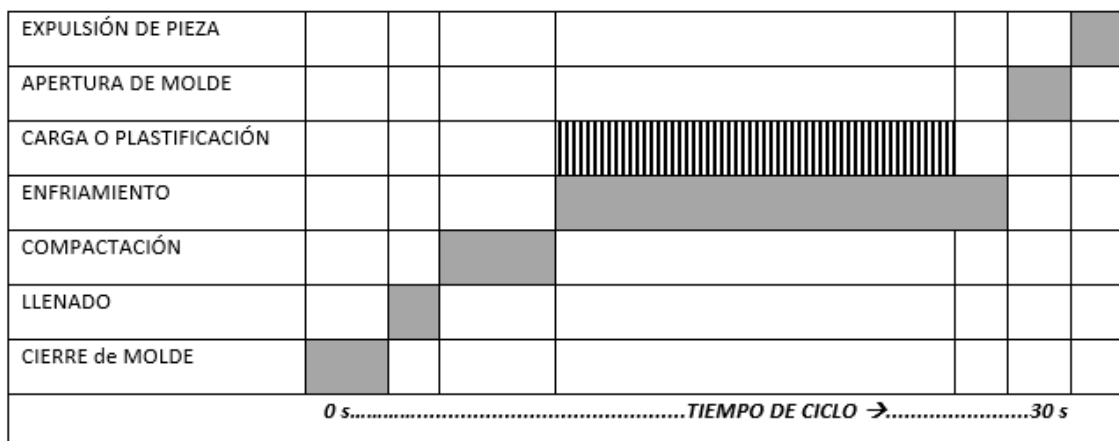


Fig 5. Fases típicas del ciclo de inyección (plastificación y enfriamiento simultáneos). Fuente: Elaboración propia.

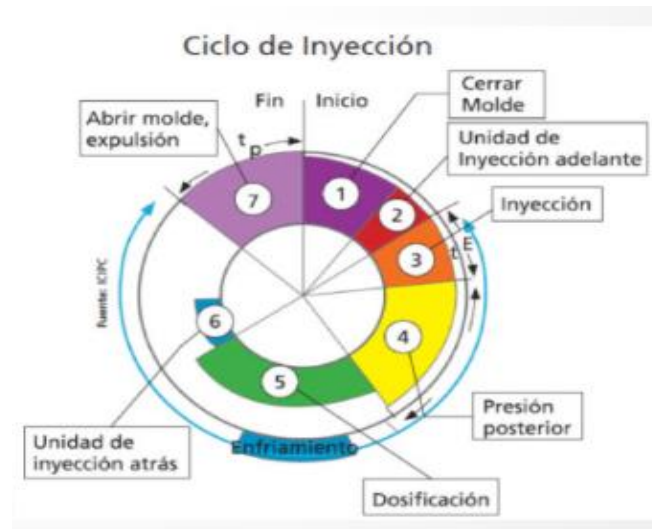


Fig 6. Fases típicas del ciclo de inyección (plastificación y enfriamiento simultáneos) con gráfica circular. Fuente: tomado de [6].

2.2 INTRODUCCIÓN A LA MICROINYECCIÓN/MICROFLUÍDICA Y DIFERENCIAS RESPECTO A LA INYECCIÓN CONVENCIONAL

A continuación, se explica para que se utiliza el moldeo por microinyección de plásticos y sus principales diferencias respecto al moldeo por inyección convencional. Es una tecnología utilizada para la fabricación de microcomponentes poliméricos y componentes con características de microescala.

La inyección y la microinyección, por supuesto, tienen muchas características en común: en ambos es necesario completar el llenado del negativo de la pieza, es decir, el hueco en el molde. Pero en el segundo caso, en la microinyección, las dimensiones esperadas tienen valores inferiores al milímetro, que se encuentran según los casos entre las micras y las décimas de milímetro. En el caso de la microfluídica, se pretende emular sistemas vivos donde los flujos tienen lugar en capilares de escasa sección de paso, si bien otros fines para estos dispositivos tienen que ver con la regulación o el control.

La escasa sección de paso es un factor limitante, tanto para la fabricación de los utillajes, que requiere de tecnologías específicas, como para el llenado de la cavidad, puesto que la reproducción de las formas se vuelve crítica [7].

Los parámetros fundamentales del proceso de inyección de plásticos en microinyección serían, [4]:

- **Temperatura:** La temperatura tiene que controlarse con mucha precisión para que el plástico inyectado funda de forma correcta. Además, este proceso requiere de un calentamiento previo para su inyección y un enfriamiento posterior para la obtención de la pieza deseada. En el proceso de enfriamiento se depende también del tipo de pieza requerido (cantidad, tamaño, forma...). Por todo esto, la temperatura es un parámetro fundamental en el proceso de transformación.

- **Presión:** La presión es un parámetro clave para que el material se enfríe de forma correcta y adapte su forma a la del molde utilizado. Una presión constante es uno de los requerimientos más importantes del proceso.
- **Velocidad:** Este proceso debe ser inmediato y rápido, ya que, en cuanto el material entra al molde ya empieza a enfriarse. Por este motivo, el paso al molde debe ser muy rápido y controlado.

El proceso como tal es similar al de la inyección convencional, donde el fundido polimérico se inyecta en una cavidad del molde. Tras las etapas de compactación y enfriamiento, el polímero solidificado se expulsa del molde para completar un ciclo de inyección.

En la inyección convencional, durante el proceso de moldeo, normalmente hay un calentador que mantiene una temperatura constante del molde, lo cual tiene ventajas, como ser relativamente económico para producir componentes de polímeros básicos, es fácil de controlar y proporciona tiempos de ciclo rápidos. Sin embargo, consecuencia de la diferencia de temperatura entre la superficie del molde y el fundido polimérico (la cual no es constante), se forma una capa congelada cuando la parte más caliente del fundido polimérico entra en contacto con la superficie más fría del molde. Esta capa puede aumentar la dificultad del relleno del polímero fundido y reducir la calidad o el brillo del acabado de la superficie de los componentes, lo que afecta directamente a las propiedades ópticas y mecánicas del acabado de los componentes, influenciados por esta diferencia de temperatura. Para evitar la formación de la capa congelada, se debe aumentar la temperatura del molde durante la etapa de llenado, pero esto también puede aumentar el tiempo de ciclo [7].

Se han planteado diferentes soluciones tecnológicas a esta necesidad de mayor control y valores de la temperatura superficial del molde, agrupadas bajo la denominación de tecnologías “heat&cool”, porque ya no se considera una temperatura de molde “casi constante” sino que se pretende tener el molde caliente en la fase de llenado y “frío” una vez que se finaliza la compactación. Pueden señalarse, entre otras, [8]:

- Calentamiento mediante resistencias eléctricas, colocadas estratégicamente cercanas a las superficies objeto de trabajo, pueden ir incluso “sumergidas” en los circuitos de refrigeración (“electrical heating”).
- Calentamiento mediante vapor de agua, a través de los circuitos de refrigeración (“steam heating”), complicando el procedimiento al implicar diferentes fases líquido vapor por los mismos conductos.
- Calentamiento mediante inducción, “induction heating”, aprovechando las corrientes generadas por los campos magnéticos alternantes generados.
- Calentamiento mediante fluidos atemperantes, frío/calor, mediante agua a presión o aceite. Este método es el seleccionado para este caso.

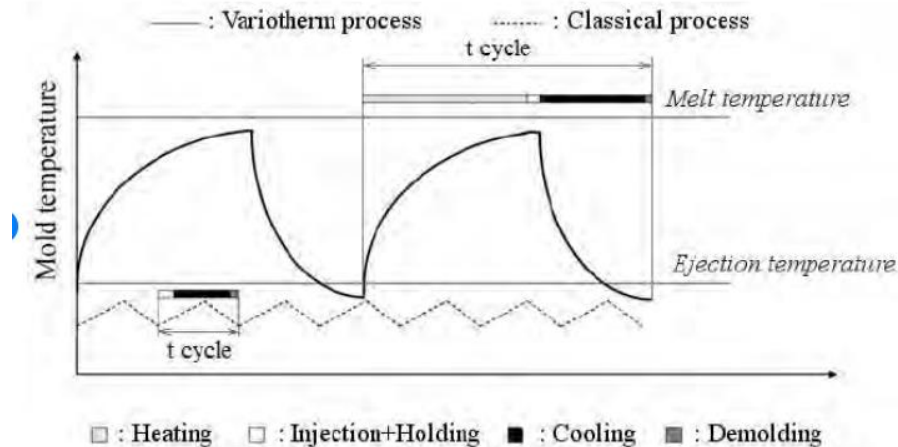


Fig 7. Comparación de la temperatura del molde en el proceso clásico frente al proceso Variotherm y su influencia en el tiempo de ciclo. Fuente: tomado de [9].

El control exhaustivo de temperatura es el parámetro clave para la microinyección. Sin ello, la fabricación no sería posible. No obstante, se pueden señalar también otros elementos a considerar:

- Limpieza del molde
- Salidas de gases para evitar posibles atrapamientos del aire en las cavidades del molde
- Control del caudal del llenado
- Control de la Reología del material y lotes de producto, para reducir la variabilidad de valores.
- Precisión de la máquina

Por tanto, la condición ideal de moldeo para la microinyección de plásticos es tener un molde caliente durante la etapa de inyección y un molde frío durante la etapa de enfriamiento, lo que se conoce como **sistema Variotherm**, el cual se utiliza en el proyecto y se desarrolla a continuación.

2.3 TECNOLOGÍA VARIO THERM EN LA MICROINYECCIÓN DE PLÁSTICOS

El sistema Variotherm es necesario porque en el proceso de inyección convencional, el polímero fundido tiende a fluir más fácilmente hacia las cavidades de un sustrato con menor resistencia al flujo mientras que puede estancarse en la entrada de microcavidades, el resultado es que el polímero fundido no las llena completamente antes de llenar el sustrato. En el proceso tenemos generalmente, junto con la ventilación al vacío, la cavidad a una temperatura similar a la del polímero fundido, por lo que permanecerá en ese estado después del llenado completo del sustrato, lo que permite un mayor llenado de microcaracterísticas y evita el efecto de vacilación [7].

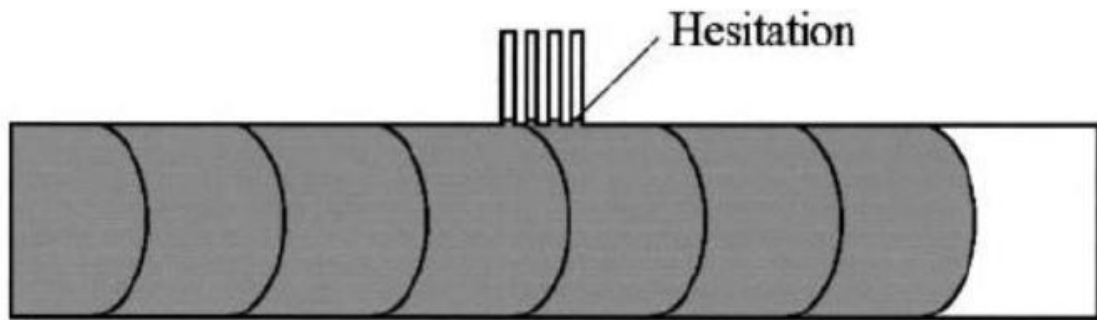


Fig 8. Efecto de vacilación en la inyección convencional. Fuente: tomado de [7].

En el caso de producirse la vacilación o duda de flujo, incluso pueden quedar sin completar las cavidades más delgadas cercanas a la entrada, lo que parece paradójico, pero es debido a que el polímero tiende a completar primero aquellas zonas más “gruesas”, donde no se enfría y puede avanzar con menor pérdida de carga.

Como se ve en la figura 8, las microcavidades no se llenan completamente por el polímero fundido, este es el caso de templado convencional del molde, donde, como se ha comentado antes, mantiene la misma temperatura durante todo el ciclo de inyección. Debido a esto, el polímero fundido no consigue llenarlas porque no es lo suficientemente líquido.

El sistema proporciona cambios de temperatura durante cada ciclo de inyección, por esto, una vez que el sistema aumenta la temperatura cerca de la temperatura de transición vítrea del plástico, la máquina de inyección inyecta el polímero fundido dentro de la cavidad, permitiendo que el plástico llene las microcavidades tanto como sea posible. Una vez que el plástico fundido las llena, el sistema disminuye de forma brusca la temperatura hasta poder expulsar la pieza [10].



Fig 9. Sistema Variotherm utilizado en las pruebas de molde. Fuente: Elaboración propia.

Este sistema debe montarse en paralelo con el molde de inyección y la máquina de inyección, ya que necesita estar en comunicación con éstos para poder saber cuándo la máquina de inyección está haciendo cada proceso, con esta información el control de temperatura dentro del molde lo está gestionando el sistema.

- **Composición y funcionamiento de la tecnología Variotherm:**

Este sistema necesita tres dispositivos para el control del proceso, dos unidades de control de temperatura (una para agua o aceite frío y otra para agua o aceite caliente) y una unidad de conmutación en contacto con la máquina de inyección para enviar la temperatura adecuada en cada momento del ciclo.

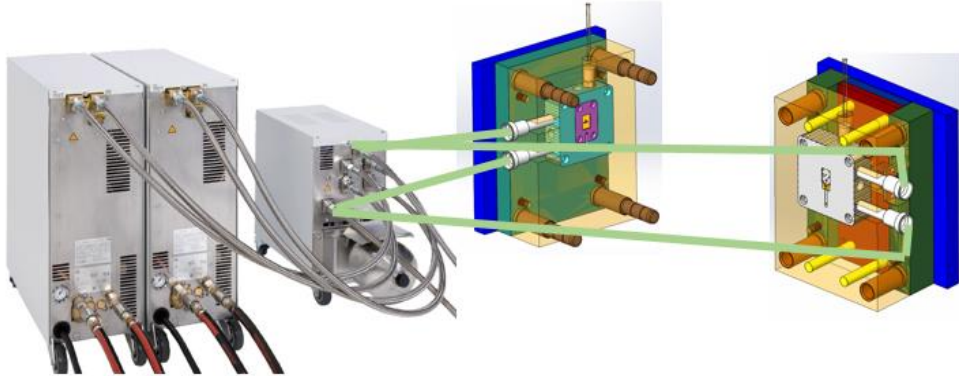


Fig 10. Unidades de control de temperatura (izquierda), unidad de conmutación (centro) y molde empleado para producir la pieza (derecha), así como la forma de conexión. Fuente: Elaboración propia.

Las unidades de control de temperatura mantienen cada temperatura de frío y calor que se necesitan durante el proceso de inyección, cada unidad controla un tipo de temperatura. La unidad de conmutación introduce la temperatura adecuada que necesita el molde en cada momento, y cuando es necesario cambiarla, esta unidad elimina los líquidos a la unidad de control de temperatura requerida (figura 10).

Esta tecnología funciona de la siguiente manera:

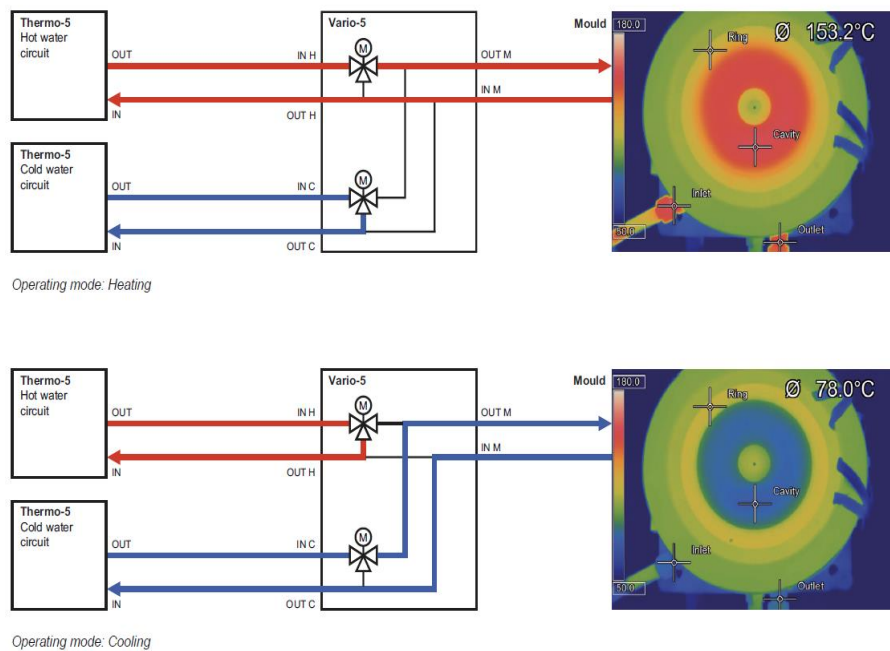
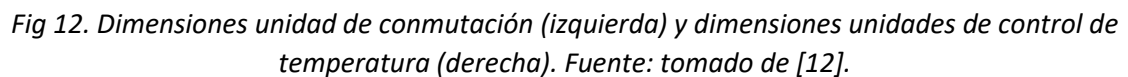


Fig 11. Funcionamiento sistema Variotherm. Fuente: tomado de [12].

Las ventajas del uso de esta tecnología son [11]:

- Dimensiones unidades de control de temperatura y unidad de conmutación y datos técnicos [12]:



13

Los datos técnicos correspondientes son [12]:

- *Tensión de la red* = 400 V; *Frecuencia* = 50 hz
- *Potencia de calefacción* = 16 Kw
- *Caudal de trabajo (bomba)* = $50 \frac{\text{litros}}{\text{minuto}}$
- *Potencia bomba* = 1 Kw
- *Potencia Refrigeración* = 30 Kw

Además, el uso de este tipo de sistemas, tienen otras ventajas como [12]:

- Menor necesidad de energía de calefacción y de refrigeración debido a :
 - Volumen mínimo de circulación, por lo que se necesita menos potencia.
 - Sofisticado concepto de refrigeración, que reduce las pérdidas.
- Bomba con eficiencia energética (Eco-bomba), con ahorro de energía por regulador de revoluciones.
- Vigilancia del proceso totalmente automática (temperaturas, caudales, presiones...).
- Mejor protección para el molde debido a:
 - Sistema cerrado sin contacto con el oxígeno.
 - Purga automática.
 - Regulación activa de la presión.

3. MATERIAL Y MÉTODO DE ESTUDIO

A continuación, se pasa a explicar el método de trabajo utilizado, en el que se analizan los posibles materiales que podrían ser empleados para la fabricación de la pieza y el material finalmente elegido, la máquina de inyección utilizada, una breve descripción de los moldes de inyección de plásticos más comúnmente empleados y el molde empleado para el proyecto y una descripción de la pieza y sus especificaciones a conseguir.

3.1 POSIBLES MATERIALES A UTILIZAR Y MATERIAL ELEGIDO

Los materiales utilizados para dispositivos microfluídicos deben poseer las siguientes propiedades [7]:

- Las propiedades térmicas son importantes, sobre todo cuando la pieza está sometida a elevadas temperaturas durante el proceso, para evitar la deformación y ablandamiento de la pieza (temperatura de transición vítrea y conductividad térmica serán críticos). Además, la capacidad del polímero para disipar calor es importante para evitar altas temperaturas locales en la pieza.
- Deben tener resistencia química a ciertos disolventes o ácidos fuertes si se producen reacciones químicas en los microcanales.
- Las aplicaciones biológicas requieren que el polímero sea biocompatible y permeable en el caso de que estén involucradas las células.
- La transmitancia luminosa es un parámetro importante si se quiere obtener una alta transparencia.

En cuanto a los materiales que deben ser utilizados en el moldeo por microinyección para la fabricación piezas, son similares a los de la inyección convencional, si se cumplen algunas condiciones, que son [7]:

- El polímero debe poseer una buena fluidez, para llenar correctamente las microcavidades. Además, como elemento adicional, la Reología debe tener un rango de dispersión de valores entre lotes tan pequeño como sea posible.
- Deben tener una alta resistencia mecánica para que la pieza resista las tensiones mecánicas asociadas con la fricción en el desmoldeo o con las fuerzas de expulsión.
- El polímero debe ser compatible con el material del molde y debe tener una solidificación rápida (intervalo de temperatura pequeño entre líquido y sólido).

Los polímeros más utilizados en moldeo por microinyección son (figura 13):

Polímero	Aplicaciones típicas en micropiezas
Polímeros de cristal líquido	Conectores, férulas y dispositivos electrónicos
Poliácido láctico	Implantes biodegradables
Polycarbonato	Aplicaciones ópticas como lentes y sensores de discos
Poliétileno	Microactuadores
Polimetilmetacrilato	Conector de fibra óptica
Poliéter éter cetona	Microcojinetes y pistones
Poliisulfonas	Carcasa de dispositivos fluidicos
Poliacetal	Microengranajes y microfiltros
Poliamida	Microruedas de engranajes

Por ejemplo, si se requiere una alta reproducción se elegirán el LCP o el COC.

Fig 13. Tabla de polímeros más utilizados en moldeo por microinyección. Fuente: [13].

La elección del mejor material para moldeo por microinyección depende de la aplicación para la que va a ser utilizado. Además, es un tema que está en investigación, pero poco a poco se va vislumbrando. Mediante pruebas realizadas, se obtuvo que los mejores resultados de llenado para moldeo por microinyección se obtuvieron con POM, PA y PBT para materiales semicristalinos y PC, PMMA y COC para polímeros amorfos. También se ha demostrado que cambiar la temperatura de la zona de fusión afecta a algunos materiales (POM), pero no afecta a otros (PP y PMMA), de donde se deduce que algunos materiales son más sensibles a la temperatura que otros.

El material elegido para la fabricación de la pieza es un **COC TOPAS 6013** (cyclic olefin copolymer) que es un polímero amorfo utilizado en moldeo por microinyección (figura 14). Este material tan peculiar ha sido desarrollado por la empresa TOPAS Advanced Polymers y se ha elegido por las siguientes razones respecto a otros polímeros también recomendables para esta función [14]:

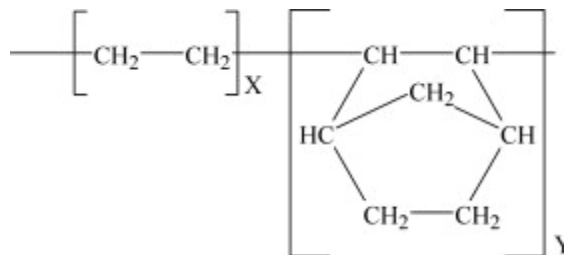


Fig 14. Composición material COC TOPAS. Fuente: tomado de [14].

- **COC TOPAS** es un polímero de cicloolefina de grado médico increíblemente puro, de hecho, más puro que la mayoría de los grados de vidrio médico. A diferencia del vidrio, tiene una superficie inerte no iónica para minimizar la desnaturalización y deslaminación, típicas en el vidrio. Los grados médicos del COC TOPAS son muy transparentes, adecuados para reemplazar al vidrio en muchas aplicaciones. Además, el riesgo de rotura se reduce al utilizar un plástico de grado médico en lugar de un vidrio.
- Este material es altamente transparente a la luz ultravioleta y visible, lo que lo convierte en una opción clara para aplicaciones de diagnóstico y análisis.
- Muchos análisis clínicos se basan en materiales como alcoholes, acetona, ácidos... Este polímero es muy resistente a éstos materiales mencionados que podrían causar muchos problemas en los plásticos comunes (PP, PMMA...). Esto convierte a éste material en la mejor solución para una amplia lista de productos microfluídicos empleados para diagnósticos. Las microplacas, cubetas y otros productos desechables emplean este material en lugar de PP, PS o PC cuando la pureza es clave para obtener resultados consistentes, que es el caso de este trabajo.
- El COC TOPAS no se ve afectado por la humedad, y debido a que la mayoría de los grados de este material son 100% amorfos, la precisión dimensional no se ve afectada. COC TOPAS es una opción segura para tolerancias estrictas, que es el caso de la pieza a tratar, con tolerancias del orden de la micra.

Este material posee diferentes grados, los cuales difieren principalmente en su temperatura de deflexión térmica. La nomenclatura de los grados del material contiene cuatro dígitos, los dos primeros indican el número de viscosidad y los dos últimos la temperatura de deflexión térmica (figura 15).

Grade	Description
8007	Clear grade with a heat deflection temperature HDT/B of 75 °C. It is especially suited for packaging of moisture-sensitive products because of its low water absorption and very good barrier properties. Grade 8007 has a lower elastic modulus and higher elongation than other TOPAS® COC grades.
5013	Clear grade with a heat deflection temperature HDT/B of 130 °C. This grade is characterized by high flowability and excellent optical properties. Recommended for applications such as optical parts, e. g. lenses, and optical storage media, where low birefringence and high molding accuracy (pit replication) are essential, as well as for medical and diagnostic applications.
6013	Clear grade with a heat deflection temperature HDT/B of 130 °C, a value which cannot be attained by many amorphous polymers. Its combination of high purity, chemical resistance, high transparency and high HDT/B makes this material useful for products such as labware. Parts made from 6013 can be gamma- and steam-sterilized.
6015	Clear grade similar to 6013, with a heat deflection temperature HDT/B of 150 °C, a value which cannot be attained by many amorphous polymers.
6017	Clear grade with a heat deflection temperature HDT/B of 170 °C. For parts requiring resistance to short-term, high-temperature exposure.

Fig 15. Descripción de las características de los distintos grados del material COC TOPAS.

Fuente: tomado de [14].

El grado elegido para la pieza a desarrollar es el **6013**, debido a que tiene una temperatura de deflexión térmica de 130 °C, valor que no pueden alcanzar muchos polímeros amorfos. Es muy recomendable para el trabajo en los laboratorios debido a su combinación de alta pureza, resistencia química y elevada transparencia.

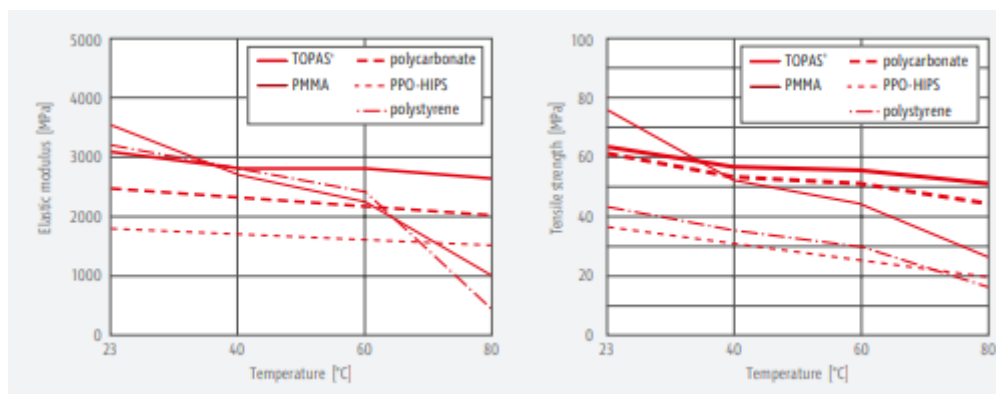


Fig 16. Módulo elástico vs Temperatura (izquierda) y Resistencia a la tracción vs Temperatura (derecha) de distintos polímeros. Fuente: tomado de [14].

A continuación, se realiza una comparativa mediante distintas gráficas de propiedades mecánicas del COC TOPAS respecto a otros polímeros comúnmente utilizados en inyección de plásticos (figura 16).

Como se aprecia en la figura 16, el COC mantiene prácticamente constante tanto el módulo elástico como la resistencia a la tracción con el aumento de la temperatura, lo que no ocurre en

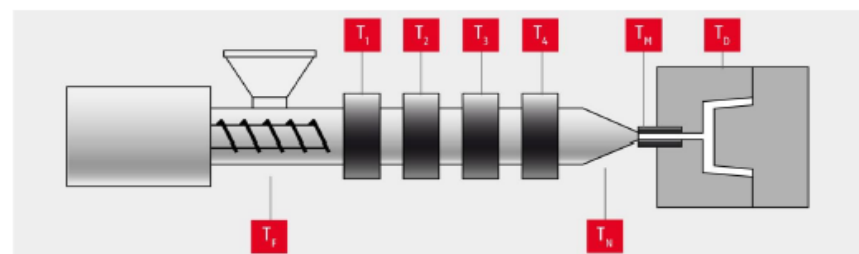
otros polímeros como PMMA, PC y PS, donde estos parámetros decrecen con el aumento de la temperatura [14].

En cuanto al comportamiento del material durante el proceso de inyección, cabe destacar que el conocimiento de éste es algo esencial para una correcta realización del proceso de inyección, en el que destaca lo siguiente [15]:

- Las temperaturas de la pared del molde dependen del grado del material utilizado.
- Tiempos de residencia excesivos pueden derivar en una coloración amarillenta del polímero fundido.
- El tiempo de retención de la inyección debe ser suficiente para evitar las marcas de hundimiento.
- Para un correcto desmoldeo de la pieza, debe haber un número de eyectores suficiente y el ángulo de desmoldeo tiene que ser lo mayor posible.

TOPAS® 6013M-07 Cyclic Olefin Copolymer

Processing Conditions for Injection Molding



Processing Temperatures

T_F	T_1	T_2	T_3	T_4	T_N	T_M	T_D
< 100 °C	230-260 °C	240-270 °C	250-280 °C	260-290 °C	240-300 °C	240-300 °C	95-125 °C
< 212 °F	446-500 °F	464-518 °F	482-536 °F	500-554 °F	464-572 °F	464-572 °F	203-257 °F
Max. Residence Time < 15 min; short interruption to cycle: reduce Tx= 170 °C 338 °F !							
Injection Pressure		P_{SP} = 500 - 1100 bar 7- 16 kpsi (specific)					
Hold on Pressure		P_N = 300 - 600 bar 4- 9 kpsi (specific)					
Back Pressure		P_{BL} = 150 bar 2200 psi max. (specific)					
Screw Speed		n_s = 50 - 200 rpm					
Injection Speed		moderate to fast (50 mm/sec - 150 mm/sec)					
Nozzle Type		free - flow					

Fig 17. Condiciones a emplear en el proceso de inyección con el material elegido. Fuente: tomado de [15].

Los parámetros de la figura 17 (Anexo III) se tendrán que tener muy en cuenta a la hora de la realización de las pruebas de molde, para estar dentro del rango correcto de los parámetros de inyección y, de esta forma, obtener una correcta fabricación de la pieza.

3.2 DESCRIPCIÓN DE UN MOLDE DE INYECCIÓN DE PLÁSTICOS

Si se realiza un estudio detallado de un elevado número de moldes de inyección, el resultado es un gran número de grupos y clases que se diferencian entre sí por su construcción completamente diferente.

Gracias a la experiencia adquirida hasta ahora en la construcción de moldes de inyección, se ha conseguido representar un procedimiento para el desarrollo metódico y planificado de moldes de inyección. Al tratar un nuevo problema, el responsable de la construcción del molde no tiene que empezar desde cero, sino que puede fijarse en cómo se ha construido un molde en casos similares, aunque deberá evaluar las experiencias y construir algo mejor, en lugar de copiar la anterior ejecución [16].

La clasificación de moldes de inyección se rige por las características principales de construcción y función, que se explicarán posteriormente, y son:

- El tipo de colada y su separación.
- El tipo de expulsión de las piezas inyectadas.
- El tipo de desmoldeo.
- La existencia o no de contrasalidas.

Según la norma DIN E 16 750, de moldes de inyección de plásticos, éstos se clasifican en varios tipos, que son [16]:

- **Molde estándar o molde de dos placas.**
- Molde de mordazas o molde de correderas.
- Molde de extracción por segmentos.
- Molde de tres placas.
- Molde de pisos o molde 'sandwich'.
- Molde de canal caliente.

Este proyecto se centrará principalmente en el molde estándar o de dos placas, que será el que se utilice para la fabricación de la pieza en distintas pruebas de molde y se explicará más en detalle posteriormente, con la explicación de las partes principales del molde en cuestión.

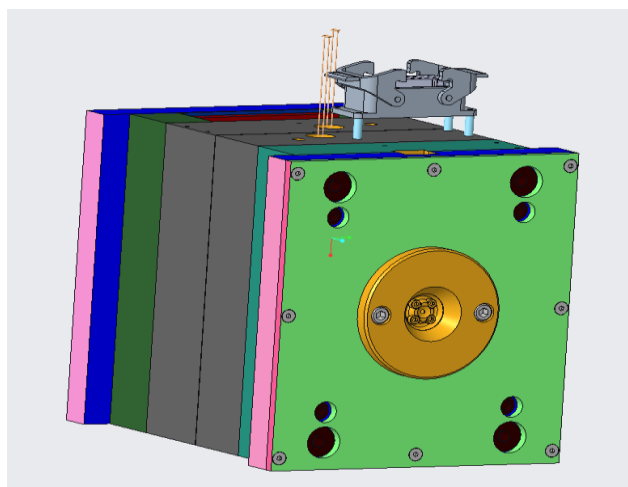


Fig 18. Molde de dos placas utilizado en el proyecto.

Fuente: Elaboración propia.

- **Materiales de fabricación de moldes de inyección y sus características:**

En cuanto a los materiales de fabricación, los moldes de inyección se fabrican generalmente con aceros para herramientas. En función de los materiales a inyectar se ha de seleccionar cuidadosamente el material a utilizar. Las exigencias para estos aceros son, entre otras [16]:

- **Alta resistencia al desgaste:** para aumentar la rigidez de las piezas inyectadas, éstas se refuerzan con fibras de vidrio, materiales minerales... a gran escala. Éstos son altamente abrasivos, por lo tanto, es de gran importancia la elección del material y el recubrimiento de las superficies.
- **Alta resistencia a la corrosión:** los componentes agresivos, como el mismo material, pueden originar agresiones químicas a las superficies del molde. Junto con los materiales de refuerzo con efectos abrasivos pueden surgir daños acumulativos en el molde.
- **Alta estabilidad de medidas:** la inyección de plásticos de elevada resistencia térmica exige temperaturas de la pared del molde de 250 °C, lo que supone la aplicación de aceros con una alta temperatura de revenido. Si no se tiene en cuenta esta exigencia, se puede producir un cambio de la estructura del molde en función de la temperatura, y con ello un cambio de las medidas del mismo.
- **Buena conductibilidad térmica:** en caso de inyectar termoplásticos parcialmente cristalinos, la conductibilidad térmica en el molde adquiere mucha importancia. Para mejorar la conducción del calor, se pueden utilizar aceros de diferente aleación.

Algunos ejemplos de aceros para herramientas que cumplen estos requisitos, son:

- Aceros de cementación.
- Aceros bonificados.
- Aceros para temple integral.
- Aceros resistentes a la oxidación.

- **Clasificación de coladas y entradas:**

En moldeo por inyección de materiales plásticos, se debe diferenciar entre:

- **Sistemas de colada fría.**
- Moldes de canal caliente.
- Sistemas de canal frío.

Los dos últimos se utilizan para la inyección 'sin colada' de piezas termoplásticas, pudiendo inyectar piezas grandes, como por ejemplo, parachoques de automóviles.

Este trabajo se centrará en sistemas de colada fría, ya que el proceso de la pieza a fabricar incorpora este sistema.

- **Sistemas de colada fría:**

Según la norma DIN 24 450, se debe diferenciar entre [16]:

- La **colada**, como una parte de la pieza inyectada, pero que no forma parte de la pieza propiamente dicha, es decir, es la parte de la pieza que finalmente se separa, en general manualmente, para ser reutilizada de nuevo como materia prima.

- El **canal de colada**, definido desde el punto de introducción del plástico en el molde hasta la entrada.
- La **entrada**, como sección del canal de colada en el punto donde se une con la cavidad del molde.

El camino del plástico hasta la cavidad debe ser lo más corto posible, para minimizar las pérdidas de presión y calor. En cuanto a la situación de la colada de entrada tiene gran importancia respecto a:

- Fabricación económica.
- Propiedades de la pieza inyectada.
- Tolerancias.
- Tensiones propias del material.

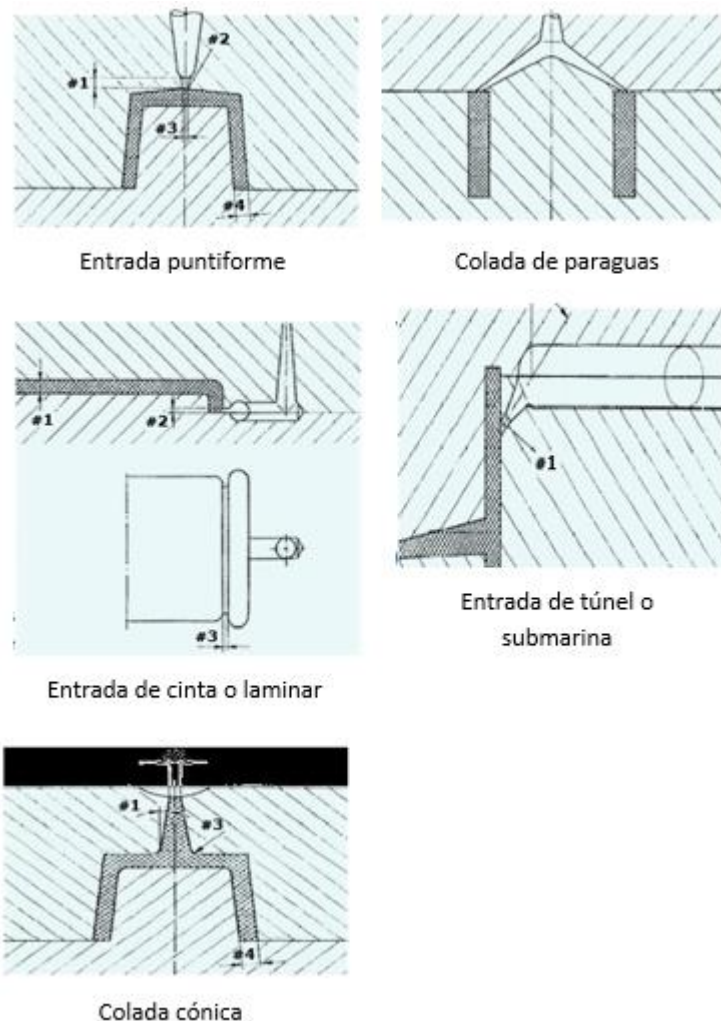
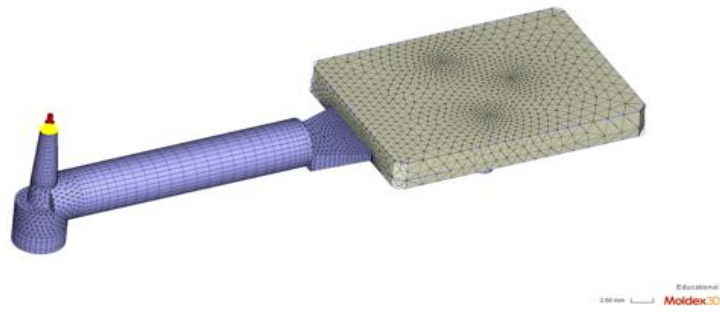


Fig 19. Resumen de los tipos de sistemas de coladas y entradas frías más usuales.

Fuente: tomado de [16].

La pieza que se desea obtener tiene un sistema de colada con **entrada laminar** o de cinta (figura 19), utilizada para fabricar piezas planas con un mínimo de contracción y de tensión. La lámina de entrada es normalmente cizallada, por lo que no impide una fabricación automática [16].



*Fig 20. Pieza + colada a obtener dibujada y mallada con el programa **Moldex3D**. Fuente: Elaboración propia.*

En la figura 20, se ve la pieza junto con la colada que se desea fabricar, donde se observa una entrada laminar del plástico.

- **Tipos de expulsores y desmoldeos:**

Debido a la contracción durante el proceso de inyección, las piezas se contraen sobre los machos del molde. Para su desmoldeo se aplican distintos tipos de expulsores, como son:

- Pasadores cilíndricos de expulsión.
- Casquillos de expulsión.
- Placas de extracción.
- Mordazas correderas.
- Separadores por aire comprimido.
- Extractores de plato o de tipo seta.

El tipo de extractor es función de la forma de la pieza a inyectar y la presión superficial sobre ésta tiene que ser la mínima posible para evitar deformaciones.

En cuanto al desmoldeo, un concepto fundamental a tener en cuenta es el **ángulo de desmoldeo**, que permite aplicar una inclinación a las caras de la pieza para permitir extraer una pieza de un molde. Este ángulo, en caso de no ser suficiente, puede dañar la superficie de la pieza [17].

3.2.1 MOLDE EMPLEADO PARA LA FABRICACIÓN DE LA PIEZA (PACHINKO)

De una forma general, el utillaje o molde debe cumplir cuatro funciones básicas [18]:

- Estructural y de soporte mecánico:** La cavidad acoge presiones de decenas de megapascals (cientos de bares) y sufren mecánicamente tanto deformación como desgaste debido a los efectos de presión y, en menor medida, temperaturas variables. Por lo tanto, deben ser resistentes mecánicamente.
- Intercambiador de calor:** el material plástico se introduce fundido (caliente) y se expulsa frío, por lo que es necesario un correcto sistema de evacuación de calor. En el caso de microinyección, es igualmente básico el control puntual de la temperatura superficial en las zonas más críticas como se ha señalado.
- Cinemático / movimientos:** debe garantizarse el paralelismo del movimiento de apertura y expulsión, guiado de las placas, movimiento de las contrasalidas (si las hubiere). Todo ello requiere de conceptos de cinemática y movimientos relativos.
- Reológica (de flujo):** el material fundido sigue las leyes de la mecánica de fluidos, con flujo fundamentalmente laminar pero compresible y complejo, puesto que las ecuaciones de transferencia de calor se acoplan con las de flujo constituyendo “capas” en el avance de material (de más frías en el exterior a más calientes en el interior). Es sin duda un campo para la mejora continua de los métodos numéricos en ingeniería.

Como se ha comentado anteriormente, el molde utilizado para la fabricación de la pieza es un molde estándar o de dos placas. En este apartado se explican las características principales y particulares de este molde, junto con una explicación gráfica de las distintas partes del molde.

- **Partes del molde PACHINKO:**

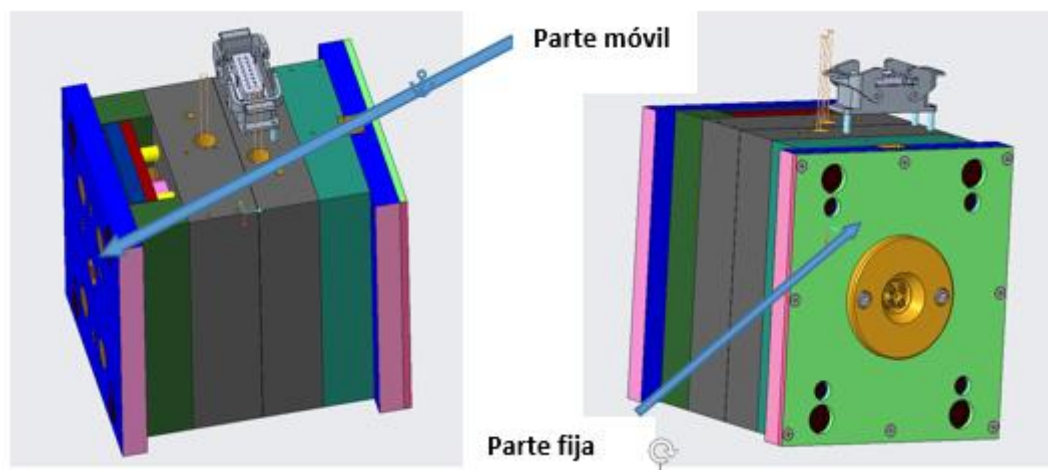


Fig 21. Molde PACHINKO. Fuente: Elaboración propia.

Este molde se compone de dos partes:

- **Parte fija o lado de inyección:** parte del molde que permanece inmóvil durante el proceso de inyección, desde la entrada del material hasta la expulsión de la pieza. Está sujeta al plato fijo y es donde se apoya el cilindro de inyección de la máquina, para introducir en el molde el plástico fundido.
- **Parte móvil o lado de expulsión:** está sujeta al plato móvil de la máquina y se mueve de forma solidaria con éste. En esta parte se ubica el sistema de expulsión de la pieza.

En la parte fija del molde, se distinguen las siguientes partes principales [19]:

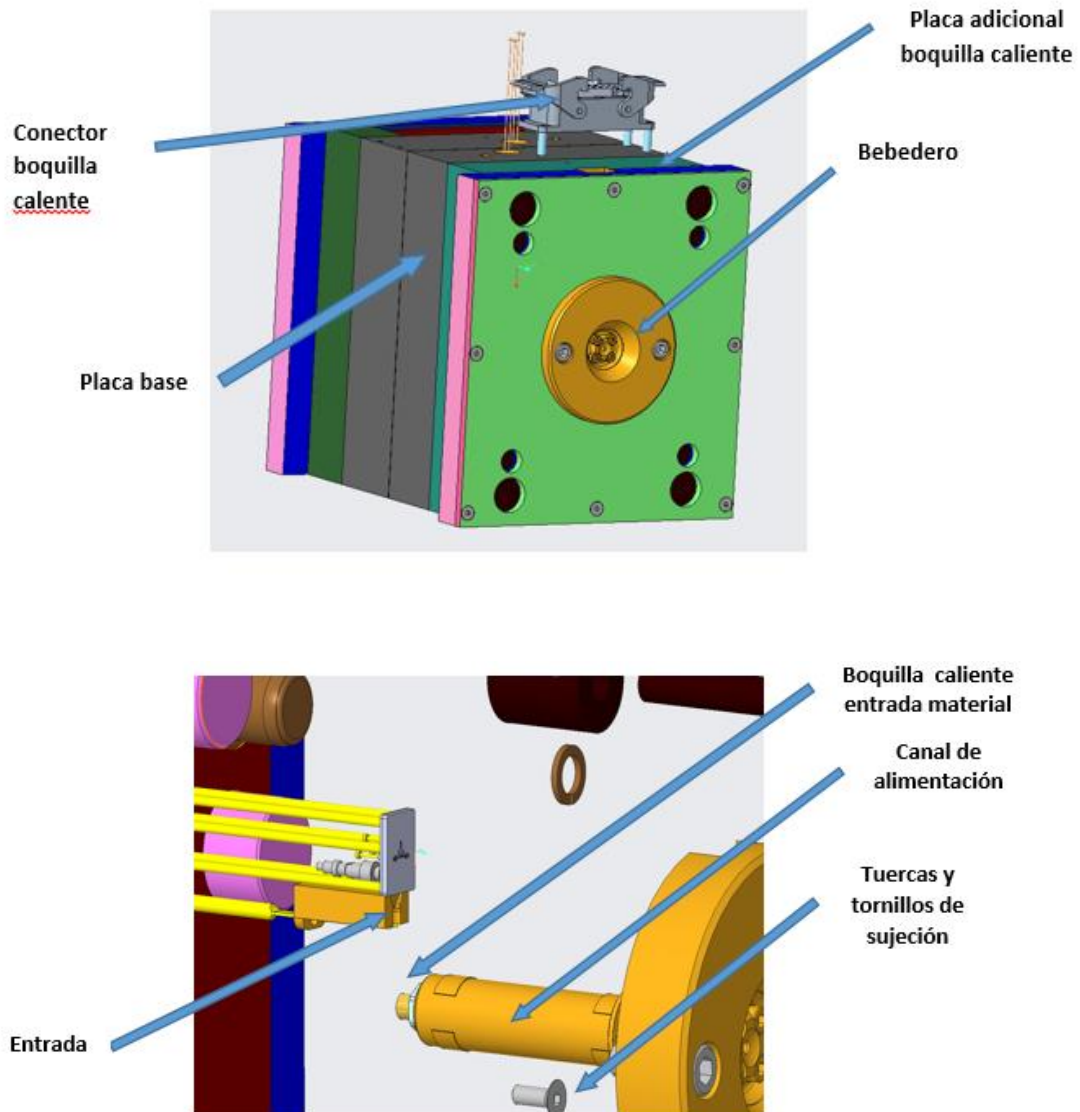


Fig 22. Distintas partes de la parte fija del molde PACHINKO con vistas del exterior e interior del molde.

Fuente: Elaboración propia.

- **Placa base:** placa de dimensiones adecuadas, para que, según el tamaño de la pieza a inyectar, queden espacios libres para poder sujetar esta placa al plato fijo de la máquina. El grosor de la placa es suficiente para evitar deformaciones y depende del peso del molde.
- **Sistema de alimentación:** a este sistema llega el plástico fundido procedente del cilindro de plastificación de la máquina y lo lleva hacia las cavidades del molde. Se compone de:
 - **Bebedero:** lleva el material desde la máquina hacia el canal de distribución. Tiene una superficie esférica o cónica donde se apoya la boquilla de la máquina inyectora.

- **Canal de alimentación:** se trata de ranuras mecanizadas en la superficie de las placas de la figura para llevar el plástico fundido hasta la cavidad.
- **Entrada:** zona estrecha donde entra el plástico fundido a la cavidad. Sus dimensiones dependen del peso, material y espesor de la pieza.
- **Guías columna:** consiste en un sistema de guías que aseguran, con un alto nivel de ajuste, un perfecto acoplamiento de ambas partes, evitando movimientos de una parte respecto de la otra cuando recibe la presión del plástico que llega a la cavidad. El número de guías suele ser cuatro para tamaños pequeños o medianos de molde y se suelen situar en las esquinas, para moldes de forma rectangular, que son los más frecuentes.

En la parte móvil del molde, se pueden distinguir las siguientes partes principales [19]:

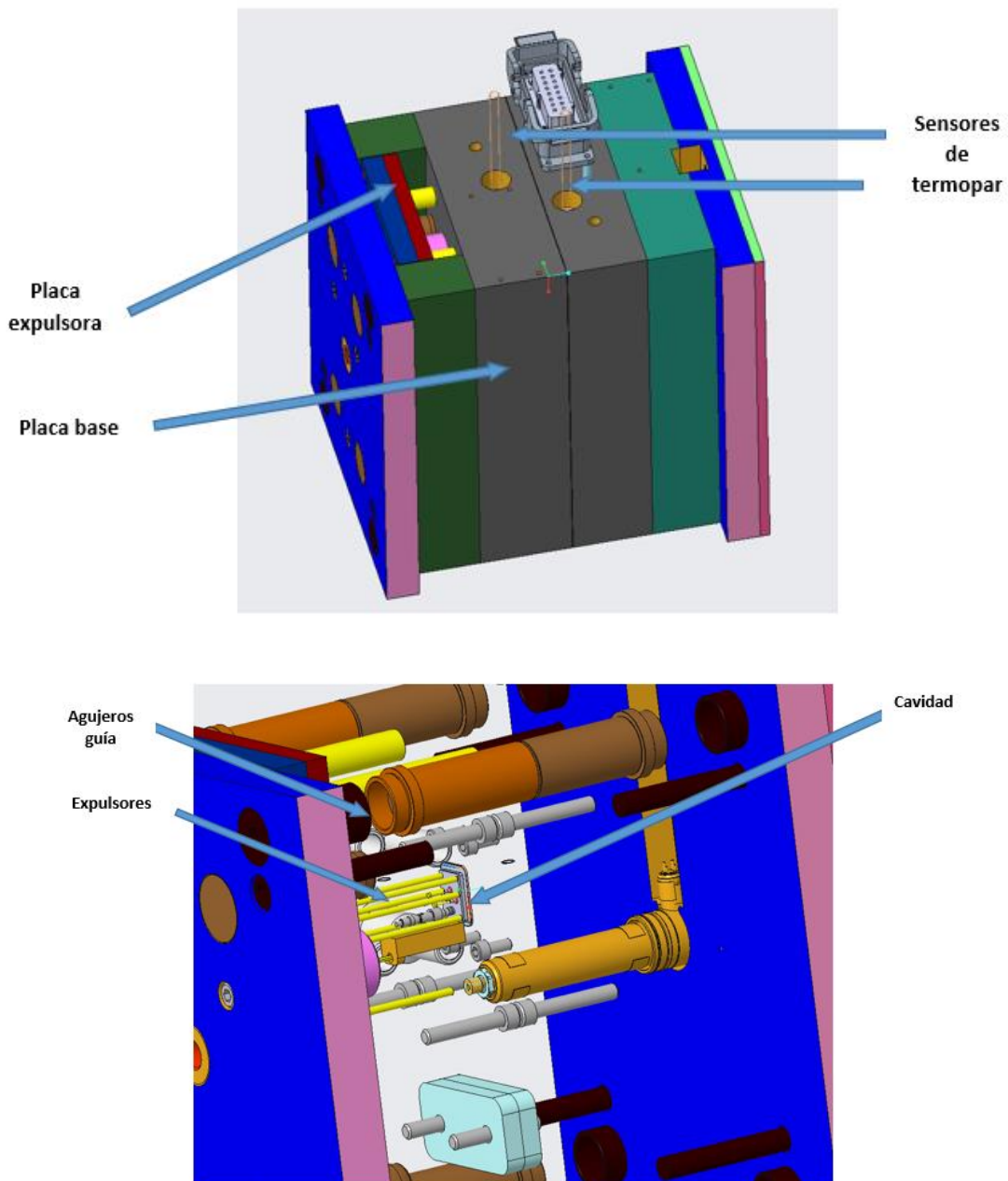


Fig 23. Distintas partes de la parte móvil del molde PACHINKO con vistas del exterior e interior del molde. Fuente: Elaboración propia.

- **Placa base:** de la misma forma que para la parte fija, sirve para la sujeción al plato móvil de la máquina de inyección. La diferencia es que no lleva centrador, pero lleva un orificio en su parte central que permite la entrada del vástago expulsor hasta la placa expulsora del molde.
 - **Placa expulsora:** es una placa doble que contiene los expulsores. Va guiada en un determinado espacio dentro de esta parte del molde y su objetivo es extraer la pieza mediante los expulsores que lleva, cuando el vástago de expulsión de la máquina hace presión sobre ella.
 - **Expulsores:** pueden tener diferentes formas, normalmente cilíndrica o laminar. Un extremo del expulsor se sitúa en la placa expulsora y la otra forma parte de la superficie del molde. Éste último, en contacto con el plástico, hace de transmisor directo en la extracción de la pieza de la cavidad. En este caso, se tienen seis expulsores cilíndricos.
 - **Cavidad:** es el elemento que da la forma deseada a la pieza mediante la introducción del plástico a través del sistema de alimentación hasta ésta. Se compone de dos mitades, y al cerrarse el molde y entrar el plástico, se llena la cavidad y la pieza toma la forma deseada. Puede llevar postizos o insertos de pieza, si se quiere insertar algún tipo de figura en la pieza.
 - **Agujeros guía:** el número agujeros suele ser cuatro para tamaños pequeños o medianos de molde y se suelen situar en las esquinas, para moldes de forma rectangular, que son los más frecuentes.
- **Características molde PACHINKO:**
 - El acero de herramienta utilizado para la fabricación del molde es el 1.2085, un acero inoxidable comúnmente utilizado en el entorno médico. Este tipo de acero se emplea para aplicaciones que requieren una elevada resistencia a la corrosión, una buena maquinabilidad y buenas propiedades mecánicas [20].
 - **Figura de acero** que sujeta el inserto de níquel en acero Rovalma Fastcool, que es un tipo de acero de alta conductividad térmica que respeta las mismas propiedades mecánicas que el acero, pero aumenta la conductividad térmica, mejorando la conmutación rápida de temperatura durante el proceso Variotherm, por lo que se puede obtener un ciclo de inyección más corto debido a la rápida forma de cambiar la temperatura dentro de la cavidad [21].

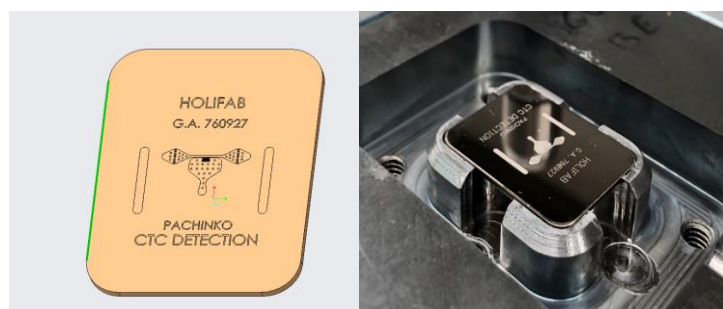


Fig 24. Figura de acero Rovalma Fastcool que sujeta el inserto de níquel.

Fuente: Elaboración propia.

- **Inserto de níquel**, que es el elemento que permite copiar las microestructuras por proceso de inyección.

El método propuesto para producir el inserto de níquel es el siguiente [22]:

1. Las estructuras se modelan mediante fotolitografía estándar en una oblea de silicio.
2. Las estructuras están cubiertas por una capa nanométrica de oro ultra puro utilizando la técnica de recubrimiento por pulverización catódica.
3. La cuña se sumerge en un baño de electrolito de níquel y, al ajustar el cátodo y el ánodo de forma adecuada, se hace crecer el níquel para producir la réplica negativa del primer producto con patrón.

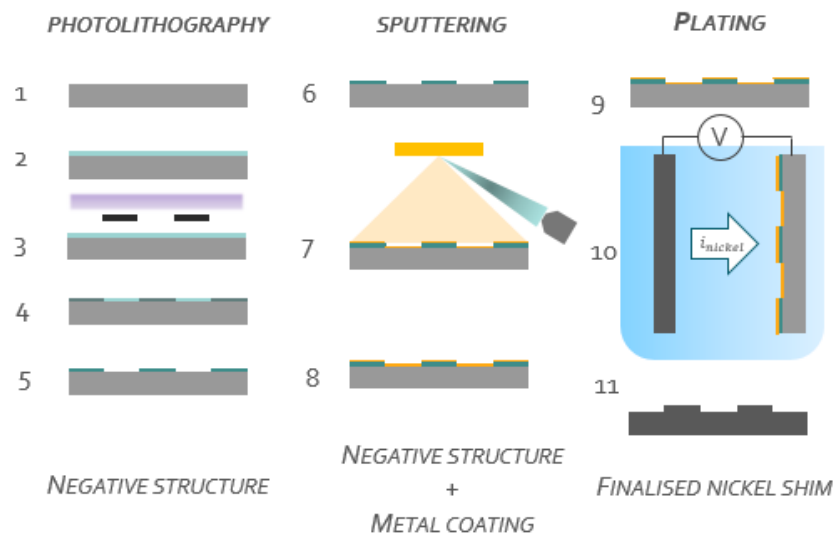


Fig 25. Producción inserto de níquel.

Fuente: Elaborado por MYPA INYECCIÓN SL.

- **Sensores de termopar** en el lado de la cavidad y el lado del núcleo, lo cual ayuda al conductor de la máquina de inyección a conocer la temperatura dentro de la cavidad durante todo el proceso de inyección [23].
- **Salida de gases** mecanizada en zonas con alto riesgo de atrapamiento de gases. Consiste en el mecanizado de canales de 15 micrómetros hacia fuera de la pieza y cerca de la zona de la cavidad para permitir que el aire dentro de la cavidad salga mientras el plástico fundido va entrando.
- **Boquilla caliente:** tiene dos áreas de control de temperatura. La unión entre la máquina de inyección y la cavidad dentro del molde se realiza mediante un dispositivo de boquilla caliente, que mejoran el proceso de inyección, lo que permite controlar más parámetros de temperatura, que ayuda a mantener el calor. Cuanto más caliente entre el plástico dentro de la cavidad, más formas de microestructura se copian en las piezas de plástico duro.
- **Taladros de refrigeración** debajo de la cavidad para permitir que la temperatura máxima cambie lo antes posible (mejor conmutación de temperatura).

3.3 MÁQUINA DE INYECCIÓN EMPLEADA

Ahora, se explica la máquina inyectora empleada en las pruebas de molde y sus características.

La máquina utilizada para las pruebas de molde es una **METEOR 550/270H** de 55 toneladas de fuerza de cierre, es decir, la fuerza a la que la placa móvil del molde choca con la placa fija para así cerrar el molde durante el proceso de inyección.



Fig 26. Máquina de inyección utilizada (derecha) y placa de características de la máquina (izquierda).

Fuente: Elaboración propia.

La elección de esta máquina para las pruebas de molde es por temas de producción de la empresa MYPA INYECCIÓN SL. Las pruebas podrían haberse realizado en una máquina de menor tonelaje, ya que no es necesaria una fuerza de cierre de 55 Tn y el molde es de pequeñas dimensiones, pudiendo montarse en una máquina más pequeña, pero el resto de máquinas estaban ocupadas con producción en serie de piezas.

El cierre de la máquina es hidráulico, mediante un avance del sistema totalmente hidráulico a través de un cilindro de desplazamiento rápido integrado en el émbolo de cierre.

- **Concordancia molde-máquina:**

- **Características de la máquina inyectora [24]:**

- *Diámetro husillo = 30 mm*
- *Volumen teórico de inyección = 113 cm³*
- *Presión específica máxima = 1705 bar*
- *Paso entre columnas (HxV) = 355 mm x 355 mm*

- **Características molde:**

- *Dimensiones molde: Anchura = 276 mm*

Altura = 316,5 mm

Largura = 296 mm

- *Peso molde = 160 kg (lado fijo = 85 kg; lado móvil = 75,2 kg)*

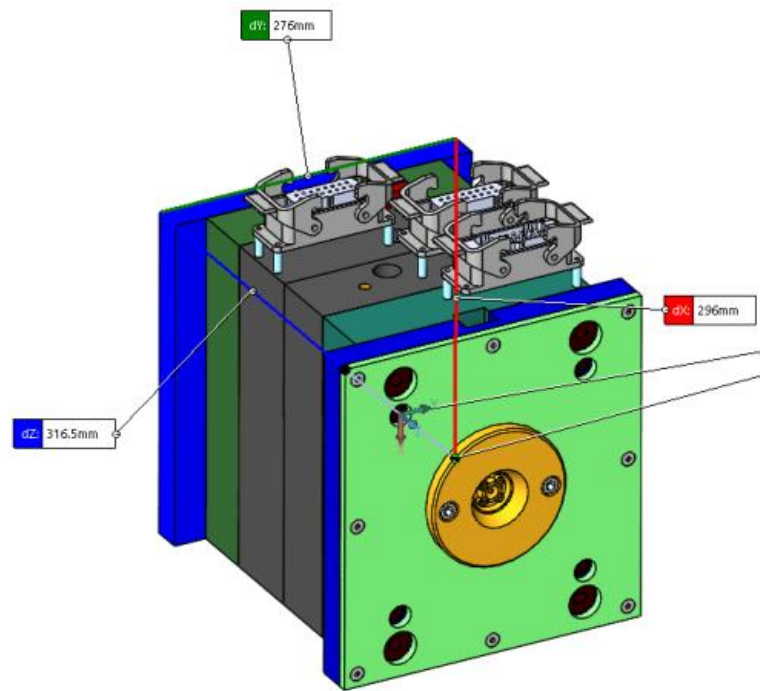


Fig 27. Dimensiones molde PACHINKO

Fuente: Elaboración propia.



Fig 28. Molde PACHINKO montado en máquina.

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta las dimensiones del molde y el paso entre columnas de la máquina de inyección, se asegura que el montaje del molde es posible en esta máquina. El molde se introduce por la parte superior de la máquina, por lo que el ancho y alto del molde debe ser inferior al paso entre columnas (HxV), para que entre de forma holgada en la máquina y el montaje sea sencillo.

3.4 DISEÑO DE LA PIEZA Y ESPECIFICACIONES A CONSEGUIR

La pieza a diseñar mediante moldeo por inyección de plásticos, tiene las siguientes medidas teóricas (CAD 3D), sin incluir las medidas objetivo del inserto de níquel:

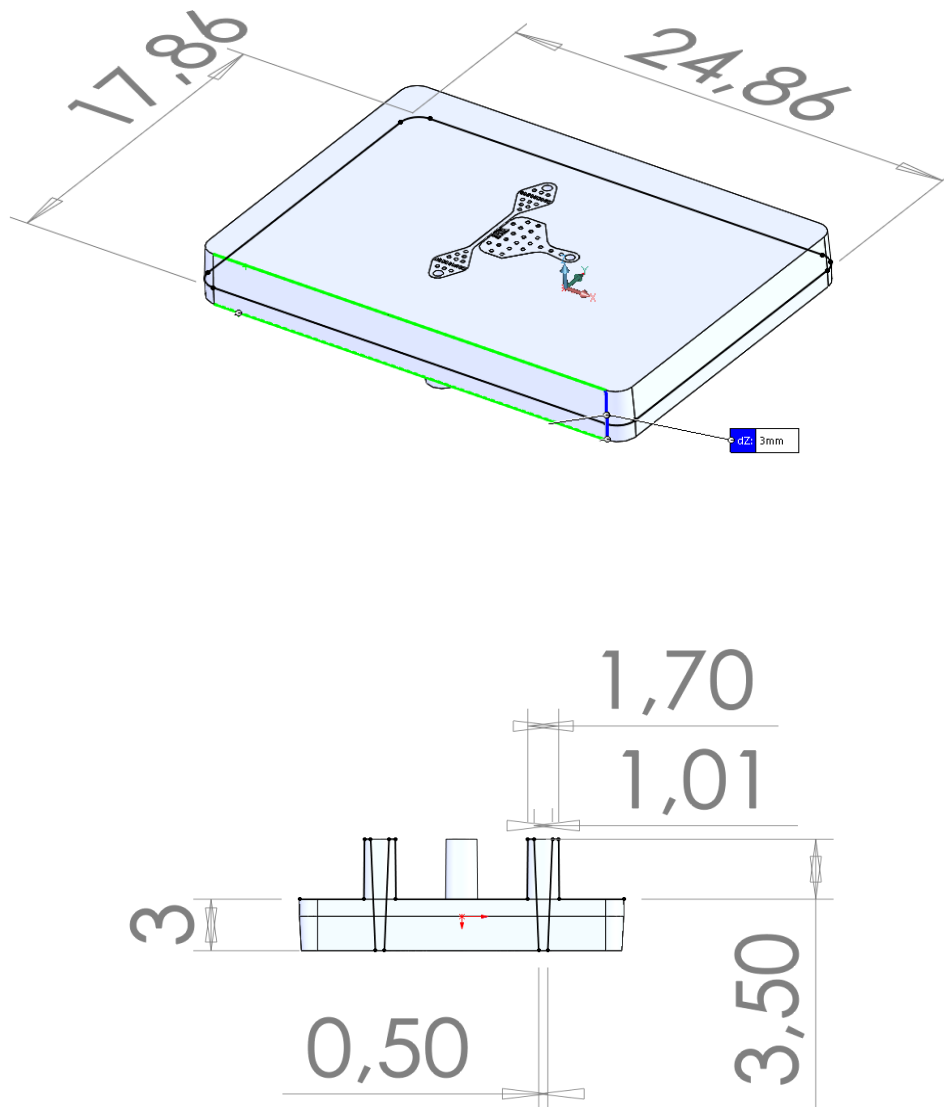


Fig 29. Medidas teóricas de la pieza inyectada (CAD 3D).

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a estas medidas de la pieza, no son el objetivo principal del trabajo, es decir, no se requerirán tolerancias específicas respecto de estas medidas, pero sí que se tiene que conseguir una pieza con una calidad dimensional aceptable.

Las **especificaciones principales** a conseguir de la pieza inyectada, que se analizarán durante los ensayos (pruebas de molde), son las siguientes:

- La pieza debe salir del molde con la mínima cantidad de defectos posible, esto se consigue con una correcta programación de los parámetros de inyección durante el

proceso de moldeo, estando dentro del rango adecuado en cada uno de los parámetros. Para ello, es muy importante tener en cuenta la hoja de parámetros de inyección que da el fabricante del material, donde se encuentra el rango correcto a emplear de cada uno de los parámetros. Algunos de los defectos más comunes son [25]:

- **Rebabas:** debido a una sobreinyección de material durante el proceso de inyección, llenándose la cavidad más de lo debido.
- **Rechupes:** debido a una falta de llenado de la cavidad del molde.

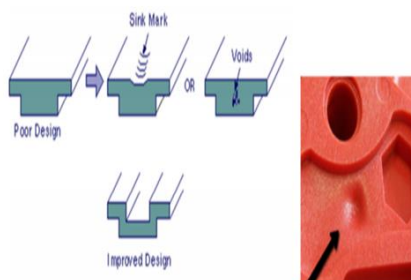


Fig 30. Rechupe en pieza de plástico inyectada. Fuente: tomado de [25].

- **Degradación del material:** debido al uso de una velocidad de inyección excesivamente alta.
- **Salida de gases:** debido a una incorrecta refrigeración del molde durante el proceso de inyección.
- **Desmoldeo incorrecto:** debido a un ángulo de desmoldeo incorrecto o a una contracción no uniforme de la pieza dentro de la cavidad, que puede ser debido, por ejemplo, a una presión de compactación incorrecta.

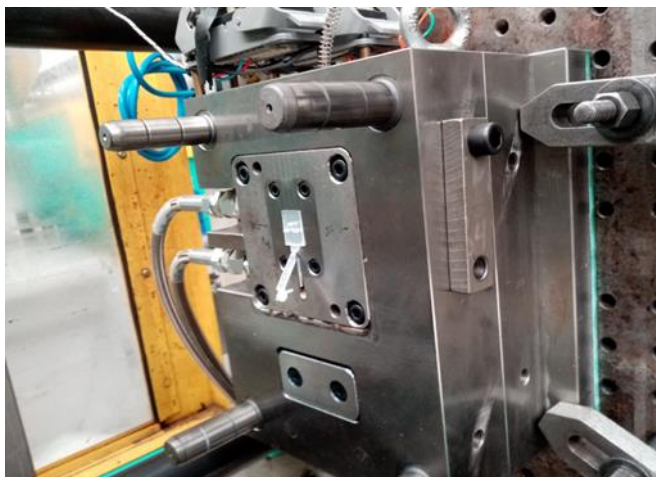


Fig 31. Desmoldeo incorrecto en una de las pruebas realizadas en el proyecto. Fuente: Elaboración propia.

- La **transparencia** obtenida en la pieza debe ser alta, en torno al 90%, ya que para las pruebas de molde se utiliza el material **COC TOPAS 6013**, explicado en el apartado 3.1 del trabajo, el cual es un material transparente, con una transmitancia luminosa del 91%, comúnmente empleado en diagnósticos médicos, por lo que la estética de la pieza es un factor importante [14].

- Las piezas inyectadas durante las pruebas de molde deben mantener un **peso y planitud estables**, que asegure una calidad dimensional aceptable. La pieza a conseguir es una pieza plana, por lo que la calidad superficial de la pieza es importante, cuyo objetivo es reducir al máximo cualquier tipo de defecto superficial.
- La pieza inyectada tiene un **inserto de níquel** en el centro, el cual contiene canales microfluídicos que deben ser llenados por el plástico alcanzando una profundidad adecuada. Esta es la parte central del proyecto, correspondiente a la microinyección de plásticos, que consiste en lo siguiente:

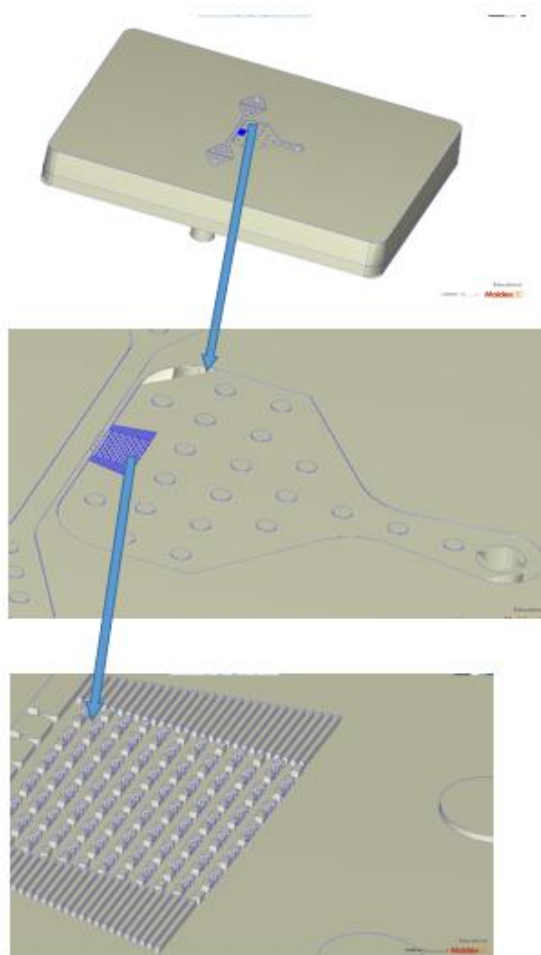


Fig 32. Pieza (CAD 3D) ampliada. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 32 (imagen inferior), se puede ver la pieza a conseguir ampliada, donde se observan los canales microfluídicos del inserto de níquel de la pieza que deben ser llenados por el plástico. Estos canales, al ser del orden de micrómetros, se medirán con el microscopio confocal **OLYMPUS BX53** tras la realización de la prueba de molde, para analizar la profundidad de llenado alcanzada por el plástico.

El objetivo final del proyecto, como se ha comentado en el apartado 1.1, es la detección de las células tumorales circulantes (**CTC**), que también son del orden de micrómetros y deben depositarse en los huecos micrométricos del inserto de níquel, por lo que la profundidad de llenado a conseguir estará directamente relacionado con esto.

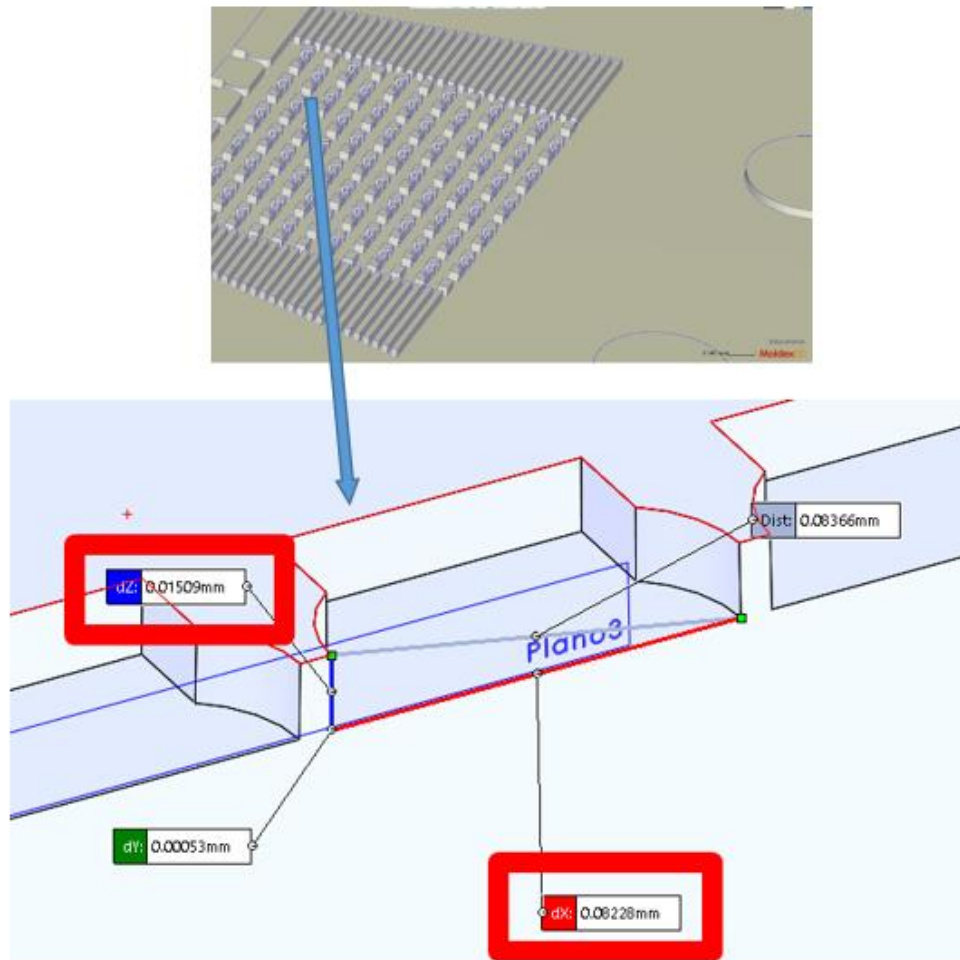


Fig 33. Ampliación de los canales del inserto de níquel (CAD 3D) con las profundidades objetivo.

Fuente: Elaboración propia.

Los objetivos de llenado de estas microcaracterísticas en este proyecto son:

- Profundidad hueco (eje Z; línea azul) = 15 micrómetros
- Ancho hueco (eje X; línea roja) = 80 micrómetros
- Grosor CTC = 6 – 7 micrómetros

El grosor de las células tumorales circulantes es del orden de seis micrómetros, por lo que, para asegurarse que las células se depositen en estos huecos y puedan ser detectadas, la profundidad de llenado alcanzada tendrá que ser considerablemente mayor, de aproximadamente el doble.

Durante el proyecto, se van a realizar dos medidas con microscopio de dos pruebas de molde distintas para realizar una comparación, que son:

- Medida con microscopio de la profundidad de llenado alcanzada en una prueba de molde **sin** el uso del sistema Variotherm.
- Medida con microscopio de la profundidad de llenado alcanzada en una prueba de molde **con** el uso del sistema Variotherm.

Mediante esta comparativa, se analizará cuán importante es el uso del sistema del sistema Variotherm en un proceso de inyección real para el llenado de microcaracterísticas y se

comparará con la profundidad de llenado alcanzada con el uso de inyección convencional (molde a temperado, con valor de temperatura constante a lo largo del proceso).

- Otro de los objetivos del proyecto es la producción en serie de piezas, por lo que el **ciclo de inyección** tiene que ser lo más pequeño posible. El ciclo de inyección depende en gran medida del espesor máximo de la pieza, que en este caso es de tres milímetros, relativamente elevado en piezas de plástico inyectadas.

Este se intentará reducir, por ejemplo, con:

- Tiempo de enfriamiento lo más corto posible, pero la pieza debe salir sin deformaciones.
 - Tiempo de compactación, el cual se programa para no alargar el ciclo innecesariamente, pero obteniendo una calidad dimensional aceptable.
 - Velocidad de inyección elevada, pero se ha de tener en cuenta que el material no debe degradarse, en todo caso la afectación al tiempo de ciclo será mínima.
- Otro aspecto importante en el diseño de la pieza son las tres 'torres salientes', de menor espesor que el resto de la pieza. Para que la pieza tenga un desmoldeo correcto, deberá contraer de forma uniforme dentro de la cavidad del molde. Aquí es clave el correcto control de la presión y tiempo de compactación (segunda fase) para que la pieza contraiga de forma uniforme.

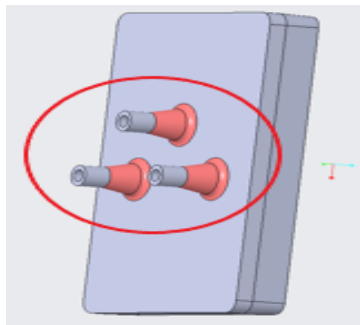


Fig 34. 'torres salientes' de la pieza inyectada. Fuente: Elaboración propia.

4. ENSAYOS Y RESULTADOS OBTENIDOS

4.1 PRUEBAS DE MOLDE Y RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación, se explica y analiza la parte correspondiente a los ensayos (pruebas de molde) con sus correspondientes resultados.

Se analizan cuatro pruebas de molde, cada una con distintos objetivos a conseguir, pero relacionadas entre sí y dependientes una de otra. Como resumen breve, estas son:

- **Prueba T0 (20 de Noviembre de 2020):**
 - Molde se inyecta sin enfriamiento en el interior.
 - Sin inserto de níquel.
 - Detección de problemas de moho en el interior del molde y asegurar los tres orificios dentro de la pieza que no están ciegos.
- **Prueba T1 (25 de Febrero de 2021):**
 - Moldeo por inyección convencional (molde atemperado).
 - Sin inserto de níquel.
 - Reducción al mínimo de defectos de moldeo por inyección (rango correcto de parámetros de inyección).
 - Conseguir transparencia elevada y peso estable.
- **Prueba T2 (20 de abril de 2021):**
 - Moldeo por inyección convencional (molde atemperado).
 - Con inserto de níquel.
 - Conseguir transparencia elevada con distintas temperaturas de molde y cámara.
 - Peso y planitud estables.
 - Medida con microscopio de las microcaracterísticas del inserto de níquel.
- **Prueba T3 (7 de mayo de 2021):**
 - Moldeo por inyección con sistema Variotherm.
 - Con inserto de níquel.
 - Correcto uso del sistema Variotherm.
 - Conseguir transparencia elevada.
 - Medida con microscopio de las microcaracterísticas del inserto de níquel.
 - Comparativa con las medidas realizadas con microscopio en la prueba T2.

Seguidamente, se analiza de forma detallada y metódica cada una de las cuatro pruebas de molde.

- **Prueba T0 (20 de noviembre de 2020):**

En esta primera prueba, el molde se inyecta sin enfriamiento en el interior y sin inserto de níquel, por lo que no se obtienen piezas finales, pero este no es el objetivo de esta primera prueba.

El objetivo principal de esta primera prueba es la detección de problemas del molde y asegurar los tres orificios dentro de la pieza que no están ciegos, así como comprobar el funcionamiento de la expulsión y relación molde-máquina.

Mediante los resultados obtenidos en esta prueba, se realizan algunas mejoras en el molde, como aumentar los canales de ventilación de gas alrededor del perímetro de la pieza y hacer más grande el punto de inyección.

Se ha realizado una simulación del llenado de la pieza con el programa Moldex3D (Anexo I), siguiendo un proceso muy similar al de la prueba T1, donde se han analizado los efectos sobre la pieza de distintos parámetros que son críticos en la obtención de una pieza sin defectos.

Cabe destacar, que uno de los parámetros más influyentes para este fin es la **temperatura de molde** durante el proceso. Se ha realizado una comparativa con temperaturas de molde a **50 y 110 °C**, analizando el efecto que esto tiene en la fase de compactación, etapa muy importante en el proceso de inyección.

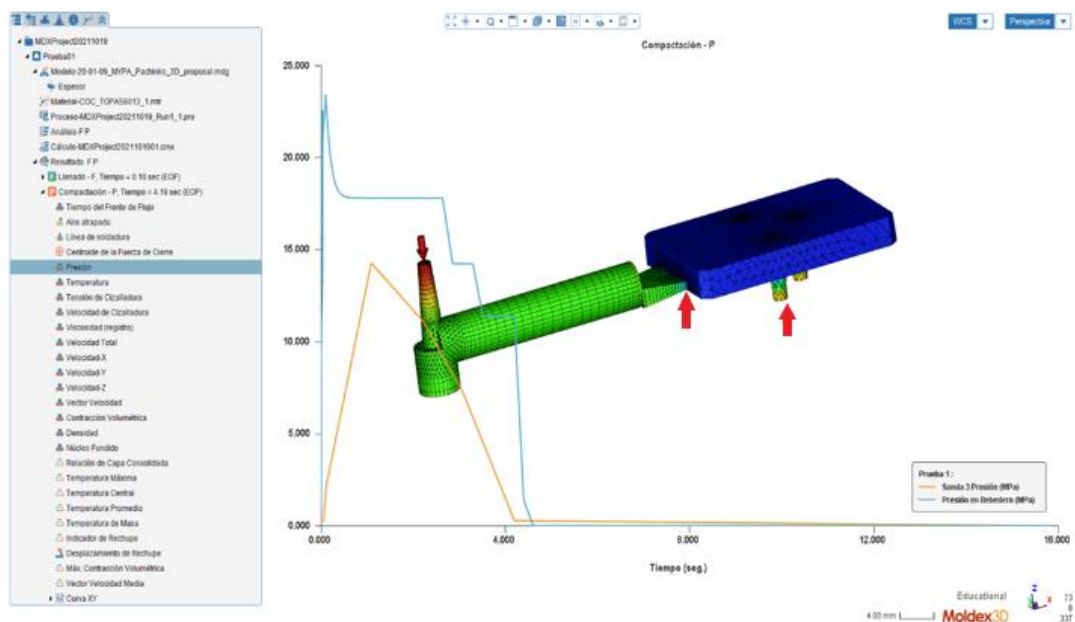


Fig 35. Distribución de presiones en el instante final de la fase de compactación (4,19 segundos) con una temperatura de molde de 110 °C. Fuente: Elaboración propia.

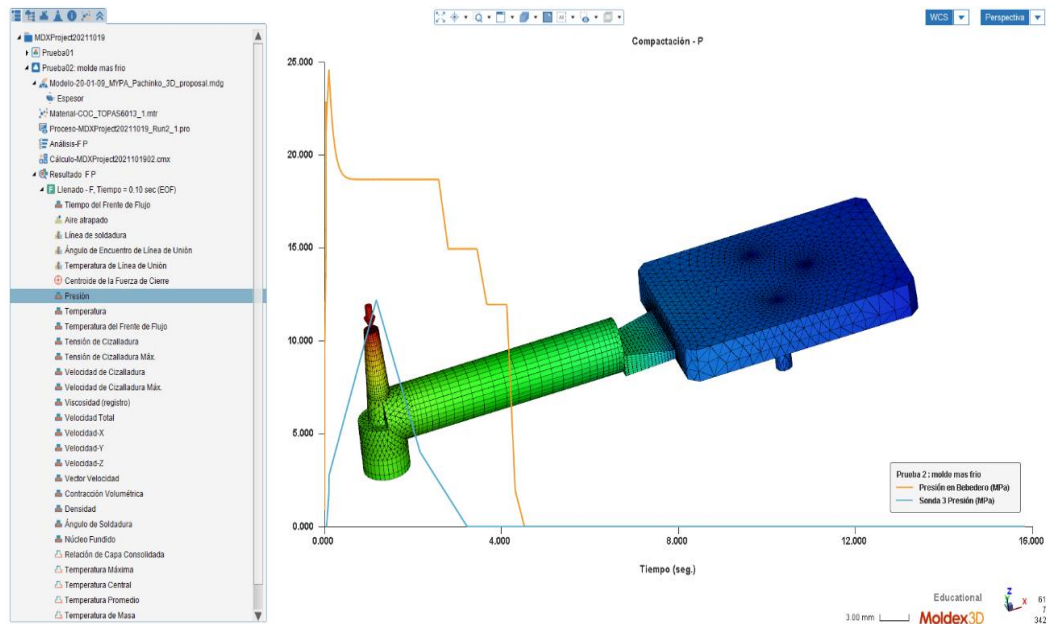


Fig 36. Distribución de presiones en el instante final de la fase de compactación (4,19 segundos) con una temperatura de molde de 50 °C. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 36, correspondiente a una temperatura de molde de 50 °C, se observa que la transmisión de presión a las zonas de la pieza más alejadas de la entrada de material es prácticamente nula, debido a que la temperatura de molde es demasiado baja y las zonas más restrictivas al paso del plástico han solidificado completamente, impidiendo el paso de material, y por tanto, la transmisión de presión.

En la figura 35, en cambio, se tiene una temperatura de molde más alta, por lo que las zonas más restrictivas al paso del plástico no han solidificado completamente. Entonces, sigue entrando material a la pieza, por lo que se sigue transmitiendo presión a las zonas más alejadas de la entrada de material, como se observa en las ‘tres torres salientes’ de la pieza.

Por tanto, una temperatura de molde baja, puede significar una contracción no uniforme de la pieza, dando lugar a desmoldeos incorrectos y deformaciones. Esto se ha de tener en cuenta durante la realización de las pruebas de molde reales.

- **Prueba T1 (25 de Febrero de 2021):**

Antes de pasar a analizar la prueba de molde T1, es necesario seguir una metodología implícita en esta prueba, para poder entender de la mejor manera posible el proceso a seguir, diferenciando las distintas etapas del proceso de inyección, los parámetros clave en cada etapa y los parámetros que se van modificando y su efecto final en la pieza, para, de esta forma, conseguir los objetivos propuestos.

Esta metodología, es necesaria en esta prueba de molde, ya que sobre esta prueba se van a sustentar las siguientes en cuanto a parámetros de inyección y consiste en lo siguiente:

Primero, se diferencian cada una de las etapas del proceso de inyección y sus parámetros clave a programar o controlar en la máquina inyectora. Estas etapas y parámetros son:

- **Dosificación:** recordar que es la etapa en la que entra la materia prima desde la tolva atravesando el cilindro de plastificación plastificando mediante los movimientos de giro y traslación del husillo y las resistencias calefactoras incorporadas en el cilindro.

En esta etapa los parámetros a programar son [26]:

- **Volumen (cm³)** de inyección.
- **Contrapresión (bar)**, que se aplica en la parte trasera del husillo y favorece la plastificación del material. Se opone al movimiento de retroceso del husillo cuando está girando y hace que este sea más lento. Como el movimiento de giro sigue siendo el mismo, el material se mezcla y plastifica mejor al estar soportando más tiempo los efectos de cizalla.
- **Perfil de temperaturas (°C)** del cilindro de plastificación, que se divide en cuatro zonas, relacionado con el tipo de material a inyectar.

- **Fase de llenado o primera fase:** se introduce el plástico en la cavidad del molde a través del husillo.

En esta etapa, los parámetros a programar son:

- **Caudal de inyección (cm³/s)**, parámetro que regula esta fase, condiciona la viscosidad y es importante para el control del llenado.
- **Presión umbral o límite (bar)**, si se alcanza este valor, se dejará de inyectar por caudal y se pasará a inyectar por presión. Actúa como protección frente a fallos o problemas operativos. Es distinta de la **presión de inyección**, la cual es consecuencia de la viscosidad y de la geometría a completar.

- **Fase de compactación o mantenimiento:** se termina de llenar la cavidad del molde mediante la aplicación de una segunda presión en la que se introduce material, con un movimiento de avance del husillo mucho más lento.

En esta etapa los parámetros a programar y controlar son:

- **Presión de compactación o segunda presión (bar)**, la cual se puede controlar. Se introduce más material para terminar de llenar la cavidad, evitando que éste vuelva hacia atrás y manteniendo una presión adecuada dentro del molde, superior a la intermedia entre las zonas con mayor y menor presión, para conseguir una contracción uniforme. Es el parámetro más influyente en la calidad dimensional de las piezas inyectadas, el cual no es posible aplicar en otros procesos con plásticos como extrusión, rotomoldeo... etc.

- **Tiempo de compactación (s)**, relacionado con la presión de compactación. Se programa para no alargar el ciclo innecesariamente, pero obteniendo una calidad dimensional aceptable.

En esta etapa también se refrigera el molde, extrayendo calor al tiempo que la pieza contrae. Las zonas clave son las zonas más estrechas, ya que son las más restrictivas al paso del plástico y, por tanto, limitan la compactación efectiva.

- **Fase de solidificación y enfriamiento:** el objetivo principal en esta fase es mantener una temperatura uniforme a lo largo de la pieza, para que el producto tenga propiedades y calidades uniformes.

Algunos de estos parámetros y otros que no se han nombrado aún, como por ejemplo la temperatura del molde o de la cámara, se van modificando a lo largo de la prueba de molde según vayan surgiendo defectos o fallos. Estas temperaturas nombradas están relacionadas con la fluidez del fundido en el interior de la cavidad, con temas relacionados con la calidad superficial y estética de la pieza, como la transparencia, entre otras cosas.

Explicada la metodología de la prueba, consistente en la puesta a punto del molde, se explica en detalle la prueba T1.

Con las mejoras realizadas en el molde en la prueba T0, se describe de forma detallada de la prueba T1. Esta prueba se realiza mediante moldeo por inyección convencional, es decir, con molde atemperado, manteniendo el interior del molde una temperatura constante durante todo el proceso de inyección y sin inserto de níquel.

Los objetivos principales de esta prueba son:

- Conseguir un **desmoldeo correcto** de la pieza, en particular de las tres ‘torres’ salientes, que es lo que puede generar problemas, ya que tienen un espesor variable e inferior al resto de la pieza, siendo más restrictivo al paso del plástico.
- Alcanzar una **transparencia** considerablemente **alta (70-80%)**. La pieza debe salir sin manchas.
- **Reducir** la cantidad de **defectos** en la pieza, como rechupes, líneas de soldadura, rebabas, marcas de hundimiento, quemaduras... etc.
- Mantener un **peso** de la pieza **estable**, el cual se pesa en una balanza (pieza + colada).

Antes de comenzar, es importante tener en cuenta que cuando se hable de presión, es **presión hidráulica** (presión aplicada en la máquina de inyección), distinta de la presión específica (presión aplicada a la masa de material), la cual es unas diez veces superior a la hidráulica [26].

- **Fase de dosificación:**

- Volumen de inyección = 72 cm³
- Contrapresión = 15 bar (recomendado por fabricante de material)
- Perfil de temperaturas (4 zonas) (recomendado por fabricante de material):
 - Zona 1 = 240 °C
 - Zona 2 = 250 °C
 - Zona 3 = 255 °C
 - Zona 4 = 260 °C

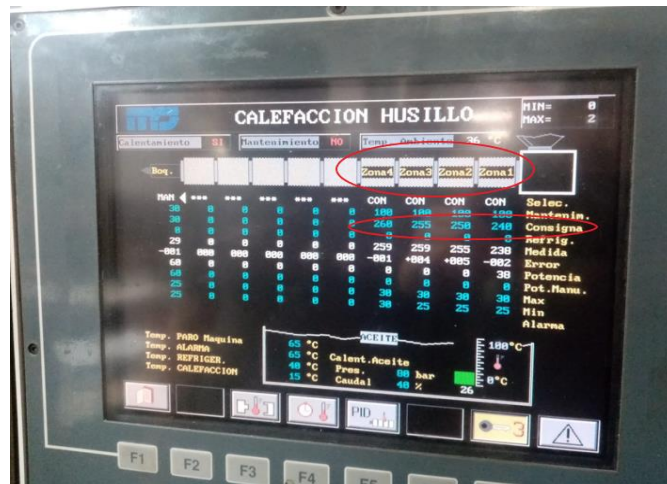


Fig 37. Perfil de temperaturas programado en la máquina de inyección. Fuente: Elaboración propia.

Llenado al 99% de la cavidad para evitar sobreinyección y aparición de rebabas en la pieza, para luego acabar de llenar la cavidad en la fase de compactación introduciendo más material, con un avance del husillo mucho más lento, rellenando los huecos generados en la cavidad debido a la contracción del material plástico durante la fase de inyección.

El volumen de inyección está relacionado con el tiempo de residencia del material en el cilindro de plastificación, evitando que se degrade al permanecer demasiado tiempo dentro del cilindro.

- Fase de llenado o primera fase:



Fig 38. Perfil de velocidades programado en la máquina de inyección. Fuente: Elaboración propia.

- Perfil velocidades inyección:
 - Velocidad inyección (etapa 1) = 20 %
 - Velocidad inyección (etapa 2) = 15 %

El círculo rojo de la figura 38 corresponde a la velocidad de avance del husillo y se expresa en este control en relación a la máxima de la máquina. Esta puede ser constante, pero en este caso se programa un perfil de velocidades en dos etapas, ya que esta posibilidad es clave para poder controlar el avance del polímero dentro del molde para que así mantenga una velocidad uniforme, ya que el flujo por el interior de la cavidad no se mantiene constante, sino que varía en función de la geometría de la pieza. Con velocidades de inyección muy altas, el tiempo de inyección disminuye, pero el material puede degradarse con facilidad. También se ve la posición en la que el flujo cambia la velocidad del 20 % al 15%, en 145 dmm y la posición de la entrada de remanencia, en 80 dmm.

- Presión umbral = 130 bar
- Presión de inyección = 115 bar (recomendada por fabricante de material)
- Tiempo de inyección = 0,58 segundos (depende de la velocidad y de la presión de inyección)

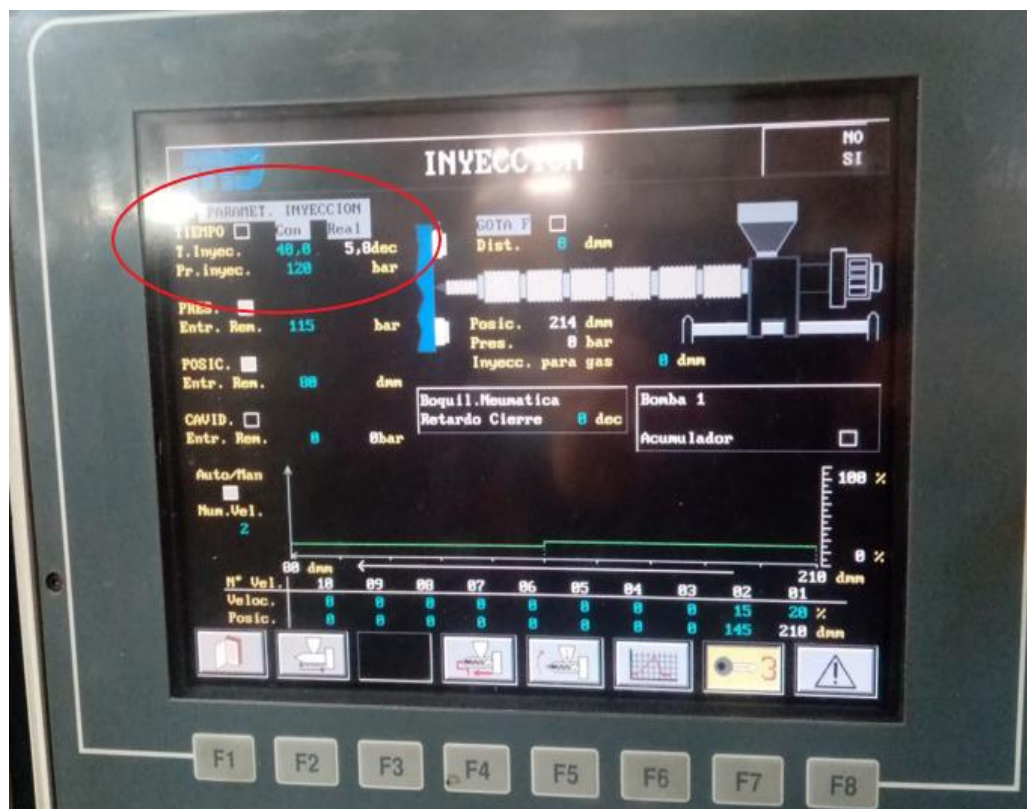


Fig 39. Presión de inyección establecida en la máquina junto con tiempo de inyección. Fuente: Elaboración propia.

La presión umbral o límite se establece en 130 bares, actuando como protección frente a fallos o problemas operativos, siendo el rango de presiones de inyección recomendadas por el

fabricante del material entre 50 y 150 bares. La presión de inyección se establece en 115 bares, estando dentro de este rango, con un tiempo de inyección real de 0,58 segundos (5,8 décimas), como se ve en la figura 39. Los tiempos de inyección deben ser cortos y, normalmente, si se aumenta la velocidad de inyección, la presión de inyección aumenta, haciendo que disminuya el tiempo de inyección. Este tiempo de inyección define el **punto de cambio a segunda fase** (fase de compactación), una vez llenada la cavidad al 99 %.

- **Fase de compactación o mantenimiento y fase de enfriamiento:**

A partir de aquí, habiéndose programado y establecido en el rango correcto los parámetros de dosificación e inyección, fijándose en la hoja de parámetros de inyección del fabricante del material, se inyectan piezas a distintas presiones de compactación, variando también la temperatura del molde. Se comparan estas piezas, buscando los objetivos planteados al principio de la prueba, que son:

- Desmoldeo correcto.
- Transparencia alta.
- Peso estable (piezas con peso similar).
- Reducción de defectos en la pieza.

➤ **Pieza 1:**

- Sin presión de compactación.
- Temp. molde = 60 °C (rango recomendado 95-125 °C)
- Temp. cámara = 300 °C (recomendado por fabricante de material)



Fig 40. Temperatura de la cámara (izquierda) y temperatura del molde (derecha). Fuente: Elaboración propia.



Fig 41. Pieza inyectada sin segunda presión. Fuente: Elaboración propia.

- Desmoldeo: correcto.
- Transparencia = 50% (cualitativamente comparado con muestras precedentes)
- Peso pieza + colada = 2,1 gramos
- Defectos: pieza rechupada.

La pieza sale rechupada debido a que no se aplica presión de compactación, por lo que deja de entrar material a la cavidad cuando ésta está llena al 99%, y debido a la contracción del plástico en el interior de la cavidad, se generan huecos que no son rellenados aplicando la segunda presión, por lo que aparecen rechupes (falta de material).

A continuación, se aumenta la temperatura del molde de forma progresiva para conseguir un aumento del brillo de la pieza (mejor estética) y una contracción uniforme y se introduce presión de compactación.

➤ **Pieza 2:**

- Presión compactación = 50 bar
- Temp. cámara = 300 °C (recomendado por fabricante de material)
- Temp. molde = 85 °C (rango recomendado 95-125 °C)



Fig 42. Temperatura del molde. Fuente: Elaboración propia.



Fig 43. Pieza inyectada con 50 bar de segunda presión. Fuente: Elaboración propia.

- Desmoldeo: incorrecto.
- Transparencia = 50% (cualitativamente comparado con muestras precedentes)
- Peso pieza + colada = 2,12 gramos

Mediante el aumento de la temperatura del molde de 60 a 85 °C, el brillo de la pieza se mantiene prácticamente igual, se sigue aumentando esta temperatura.

La pieza no desmoldea correctamente, quedándose una de las tres 'torres salientes' en el molde. Esto es debido a que la pieza no contrae de forma uniforme en el interior de la cavidad. Estas tres 'torres salientes' corresponden a una zona clave de la pieza, más restrictiva al paso del plástico que el resto de la pieza, ya que es una zona de menor espesor, por lo que el resto de la pieza enfría antes que esta zona, provocando que la pieza tenga un desmoldeo incorrecto. La clave para solucionar esto es el control de la presión de compactación, que debe ser como mínimo una **presión intermedia** entre la **máxima** (zona más cercana al punto de inyección) y la **mínima** (zona más alejada del punto de inyección) presión de inyección y la temperatura del molde, la cual se sigue aumentando. Se aumenta esta presión, con el objetivo de mantener una presión uniforme durante la contracción.

El peso aumenta a 2,12 gramos, aumento pequeño, ya que al incrementar la presión de compactación, la pieza tiene una contracción final menor, saliendo del molde más grande y pesada.

➤ **Pieza 3:**

- Presión compactación = 90 bar
- Temp. cámara = 300 °C (recomendado por fabricante de material)
- Temp. molde = 120 °C (rango recomendado 95-125 °C)

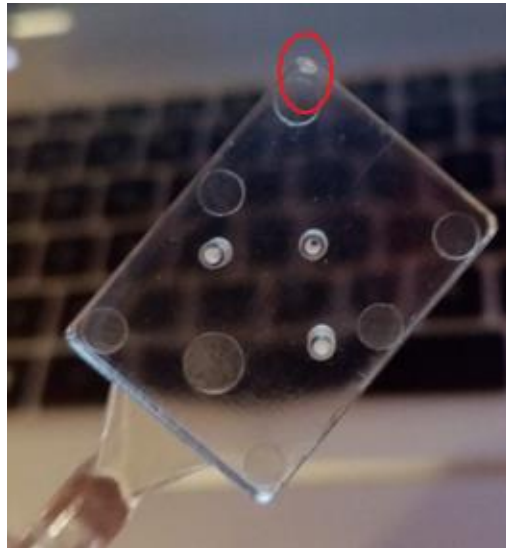


Fig 44. Pieza inyectada con 90 bar de segunda presión. Fuente: Elaboración propia.

- Desmoldeo: correcto.
- Transparencia = 70% (cualitativamente comparado con muestras precedentes)
- Peso pieza + colada = 2,15 gramos
- Defectos: salida de gases en esquinas.

Al aumentar la temperatura del molde de 85 a 120 °C, la pieza mejora su estética considerablemente, con un aumento del brillo, provocando un aumento de la transparencia del 50 al 70 % aproximadamente.

Esta vez, la pieza desmoldea de forma correcta al aumentar la presión de compactación y la temperatura del molde, debido a una contracción más uniforme del plástico en la cavidad, manteniendo una presión uniforme en toda la pieza durante esta etapa.

El peso aumenta a 2,15 gramos, aumento nuevamente pequeño, pero coherente al aumentar la presión de compactación, saliendo la pieza algo más grande y pesada.

Se tiene salida de gases en las esquinas, que puede ser debido a una presión de compactación algo inferior a lo debido.

➤ **Pieza 4:**

- Presión compactación = 100 bar
- Temp. cámara = 300 °C (recomendado por fabricante de material)
- Temp. molde = 120 °C (rango recomendado 95-125 °C)

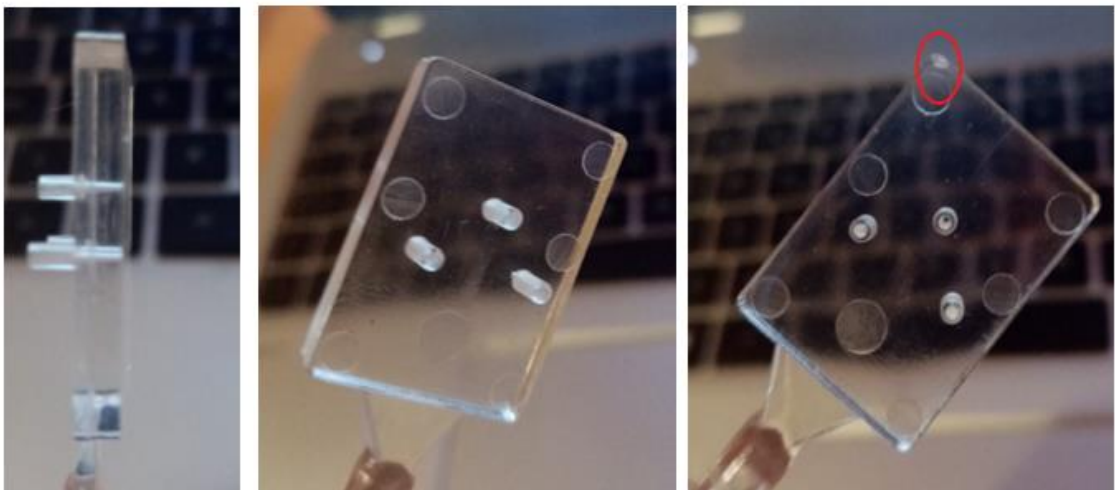


Fig 45. Piezas inyectadas con 100 bar de segunda presión sin salida de gases (izquierda y centro) y pieza inyectada con 90 bar y salida de gases en las esquinas (derecha). Fuente: Elaboración propia.

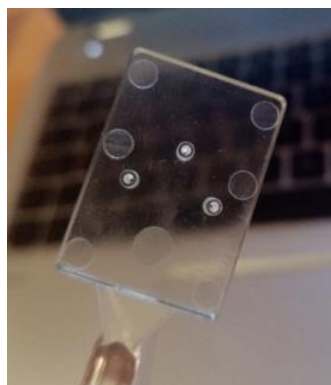


Fig 46. Pieza inyectada con 100 bar de segunda presión. Fuente: Elaboración propia.

- Desmoldeo: correcto.
- Transparencia = 70%
- Peso pieza + colada = 2,16 gramos
- Defectos: sin defectos aparentes.

La temperatura del molde se mantiene en 120 °C, por lo que la transparencia se mantiene prácticamente idéntica.

Finalmente, se aumenta la presión de compactación a 100 bar con el objetivo de corregir el defecto de la salida de gases, el cual se consigue solucionar.

El peso aumenta a 2,16 gramos, aumento, de nuevo pequeño, pero coherente al aumentar la presión de compactación, saliendo la pieza algo más grande y pesada.

- **Objetivos cumplidos prueba de molde:**

- Se consigue un desmoldeo correcto de la pieza.
- Se alcanza una transparencia de aproximadamente un 70 %, lo cual es aceptable, pero con margen de mejora. En la siguiente prueba se intentará mejorar este aspecto.
- Se reducen al mínimo los defectos en la pieza.
- Se mantiene un peso prácticamente estable, con pequeños aumentos, por tanto, se consigue una calidad dimensional aceptable. Aunque este no era uno de los requisitos principales de esta prueba, no sería aceptable aumentos o disminuciones bruscas del peso de la pieza.

Un parámetro importante a comentar es el **tiempo de compactación**, que es de unos cuatro segundos, debiéndose programar de tal forma para no alargar el ciclo innecesariamente, pero obteniendo una calidad dimensional aceptable. Conforme mayor sea este tiempo, más material entra a la cavidad en esta etapa, por lo que la pieza será más grande y pesada (menor contracción final).

El ciclo de inyección es de unos treinta segundos. Este tiempo debe ser el mínimo posible para la fabricación en serie, pero obteniendo pieza con una calidad adecuada.

El ciclo de inyección depende, en gran medida, del espesor máximo de la pieza, que en este caso es de tres milímetros, elevado en piezas fabricadas por inyección de plástico para grandes volúmenes de producción. Conforme mayor sea el espesor máximo de la pieza, mayor es el tiempo de enfriamiento de ésta, por lo tanto, el ciclo de inyección se eleva. En este caso, el tiempo de enfriamiento es de unos quince segundos.

- **Prueba T2 (20 de abril de 2021):**

Esta prueba de molde se realiza nuevamente mediante inyección convencional (molde aatemperado), pero con la introducción del inserto de níquel en la cavidad molde para la posterior medida de las microcaracterísticas de éste.

Los parámetros de inyección son idénticos a los de la prueba anterior (prueba T1), donde éstos se van ajustando hasta que la pieza sale del molde prácticamente sin defectos. Por tanto, la prueba T1 es sobre la que se van a sustentar el resto de pruebas en cuanto a los parámetros del proceso de inyección (presión de inyección, tiempo de inyección, velocidades de inyección, presión de compactación, tiempo de compactación...).

Los **objetivos** de esta prueba de molde son:

- Análisis de las piezas con variaciones de la temperatura del molde de 60 a 120 °C, donde se estudia:
 - **Estabilidad** del peso de las piezas (pieza + colada).
 - **Planitud** de las piezas.
 - **Transparencia (80-90%)**.
- Mediante la introducción del **inserto de níquel** en el molde, se medirá con un microscopio confocal, tras la prueba, la profundidad a la que consiguen llenar las microcaracterísticas del inserto mediante inyección convencional, para posteriormente, comparar estas medidas con las de la siguiente prueba, mediante el uso del sistema Variotherm, donde se supone, que la profundidad alcanzada debe ser mayor. En esta prueba se intenta llegar a temperaturas de molde altas (120-130 °C), para copiar lo mejor posible las microestructuras del inserto de níquel.

- **Análisis de piezas a distintas temperaturas de molde y cámara caliente:**

Tras la inyección, a distintas temperaturas de molde y cámara caliente, los resultados son los siguientes:

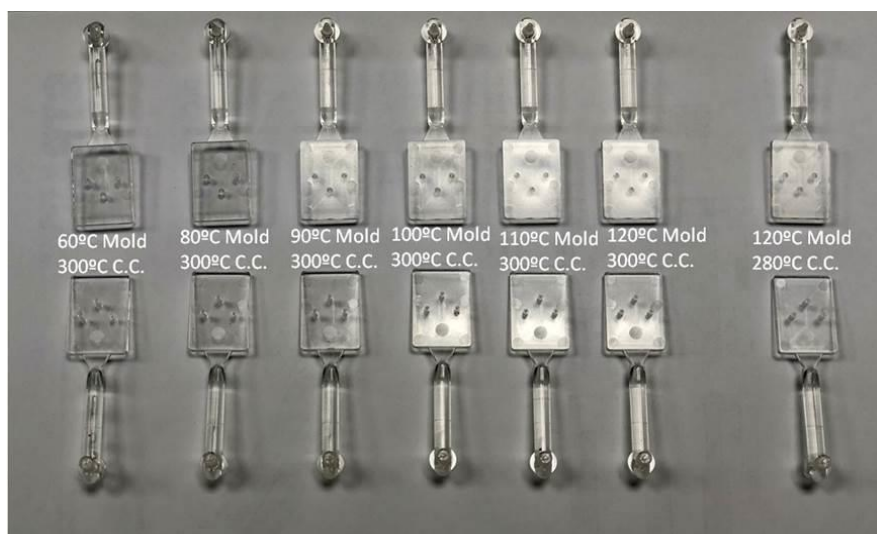


Fig 47. Piezas correspondientes a la prueba T2 a diferentes temperaturas de molde. Fuente: Elaboración propia.

Parámetros	Molde: 60°C/C.C.C: 300°C	Molde: 80°C/C.C.C: 300°C	Molde: 90°C/C.C.C: 300°C	Molde: 100°C/C.C.C: 300°C	Molde: 110°C/C.C.C: 300°C	Molde: 120°C/C.C.C: 300°C	Molde: 120°C/C.C.C: 280°C
Peso (pieza+colada) [gr]	2,136	2,152	2,137	2,152	2,156	2,156	2,158
Planitud [mm]	X > 0,02	X > 0,05	X > 0,02	X > 0,02	X > 0,02	X > 0,02	X > 0,02
Transparencia [%]	70%	70%	70%	70%	70%	70%	90%

Fig 48. Tabla de características de peso, planitud y transparencia correspondientes a piezas inyectadas en la prueba T2. Fuente: Elaboración propia.

De los resultados de esta parte de la prueba, se puede decir que:

- **Peso** de la pieza + colada se mantiene **estable**, sin cambios bruscos, como cabía esperar, al utilizarse parámetros de inyección idénticos a la prueba anterior.
- **Tolerancia de planitud** del orden de 0,02 mm, lo cual es aceptable, también se mantiene estable durante la prueba. Esta se define como la cantidad que se le permite variar a los elementos de una superficie respecto a un plano teórico.
- **Transparencia** conseguida de la pieza del 90 %, al incrementarse la temperatura del molde desde los 60 hasta los 120 °C, lo cual aporta mayor brillo (estética) a la pieza y disminuirse la temperatura de la cámara caliente (C.C.C) 20 °C, hasta los 280 °C.

- **Medidas con microscopio del inserto de níquel:**

Seguidamente, se mide con el **microscopio confocal OLYMPUS BX53** [22] la profundidad a la que se consiguen llenar las microcaracterísticas obtenidas en la zona del inserto de níquel.

Se recuerda lo que debe ser medido y los objetivos a conseguir:

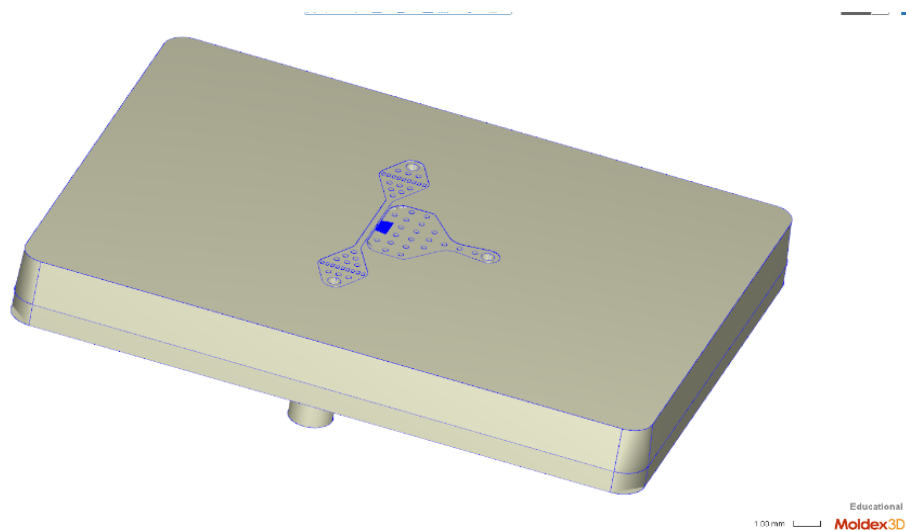


Fig 49. Pieza PACHINKO 3D con el programa **Moldex3D**. Fuente: Elaboración propia.

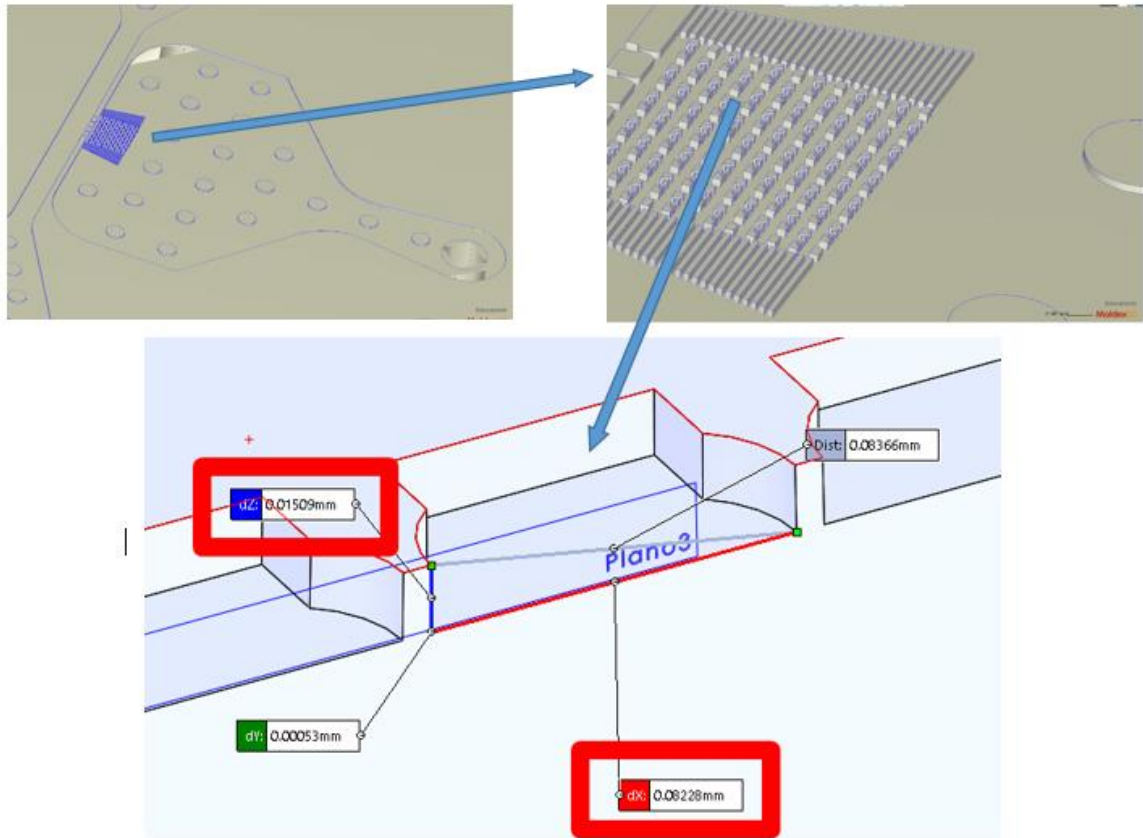


Fig 50. Ampliaciones del inserto de níquel de la pieza PACHINKO (CAD 3D) con el programa **Moldex3D**. Fuente: Elaboración propia.

Se debe medir la profundidad de llenado alcanzada en los huecos micrométricos indicados en la figura 50. Los objetivos a conseguir, por lo tanto, son:

- Profundidad hueco (eje Z; línea azul) = 15 micrómetros
- Ancho hueco (eje X; línea roja) = 80 micrómetros

El **grosor** de las **CTC** es del orden de **6-7 micrómetros**, por lo que, para asegurarse que éstas células se depositen en los huecos micrométricos del inserto de níquel, la profundidad de éstos debe ser de aproximadamente el doble del grosor de las CTC.

Los resultados obtenidos en esta parte de la prueba son los siguientes:

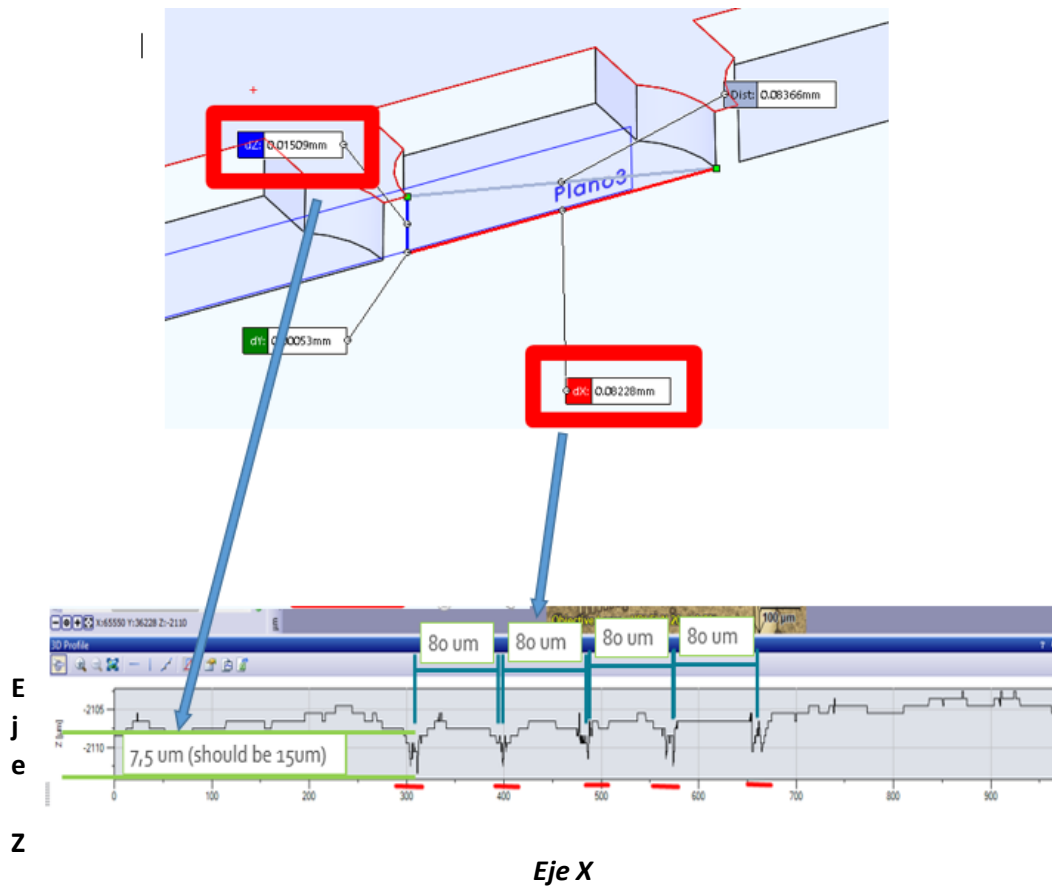


Fig 51. Ampliación de las microestructuras del inserto de la pieza PACHINKO 3D junto con los resultados obtenidos en las medidas con microscopio. Fuente: medidas realizadas por Microliquid.

- Profundidad hueco microscopio (eje Z; línea azul) = 7,5 micrómetros

Esta profundidad es medida, como se ve en la figura 51, en el eje Z entre las dos líneas verdes horizontales (escala en micrómetros).

- Ancho hueco microscopio (eje X; línea roja) = 80 micrómetros

Entonces, a la vista de los resultados, se tiene lo siguiente:

- Profundidad microscopio = 7,5 micras → Profundidad CAD = 15 micras
- Ancho microscopio = 80 micras → Ancho CAD = 80 micras

Se consigue alcanzar los 80 micrómetros de ancho en los huecos del inserto, pero lo realmente complejo, es alcanzar los 15 micrómetros de profundidad, donde se ha conseguido alcanzar 7,5 micrómetros en esta tercera prueba, lo que no es suficiente.

Esto es debido, como ya se ha explicado anteriormente en el trabajo, al efecto de vacilación del plástico fundido al entrar en las microcavidades, donde, al no ser lo suficientemente líquido, no las consigue llenar del todo. La solución a esto es el uso del sistema Variotherm, donde el plástico alcanza temperaturas mayores dentro del molde, siendo más líquido y, de esta forma, consiguiendo llenar las microcavidades lo máximo posible.

- **Prueba T3 (7 de Mayo de 2021):**

Esta prueba de molde se centra en el uso del sistema Variotherm, donde se explica:

- Conexiones y montaje del sistema al molde y a la máquina de inyección.
- Temperaturas fijadas de calentamiento y enfriamiento de las unidades de control de temperatura y su efecto.

Por tanto, los objetivos de esta prueba de molde son los siguientes:

- Correcto uso del sistema para el llenado de las microcaracterísticas del inserto.
- Comparativa de las medidas con microscopio de las microestructuras del inserto de níquel respecto a las de la prueba anterior con inyección convencional (molde atemperado).
- Pieza inyectada sin defectos. Esto debe conseguirse fácilmente, ya que, se sabe cuáles son los parámetros correctos de inyección a utilizar para obtener una pieza correcta (prueba T1).
- **Uso del sistema Variotherm:**

Primero, se conecta el sistema al molde y a la máquina de inyección, como se ha explicado anteriormente en el apartado 2.3 del trabajo.



Fig 52. Conexiones de las unidades de control de temperatura con la unidad de conmutación y esto a su vez con el molde (izquierda) y unidades de control de temperatura (derecha). Fuente: Elaboración propia.

En la figura 52 se ven la conexiones de las unidades de control de temperatura con la unidad de conmutación, que a su vez se conectan al molde de inyección, para hacer así funcionar el sistema durante la prueba de molde realizada en mayo de este mismo año.

Para comenzar, se fijan las temperaturas de calentamiento y enfriamiento de las unidades de control de temperatura. Teniendo en cuenta la temperatura de transición vítrea del material, que en este caso se tiene la ventaja de poder variar esta temperatura gracias al desarrollo de esta nueva clase de materiales poliméricos, cubriendo una amplia gama de temperaturas que varían de 80 a 180 °C.

Las temperaturas a las que se fijan las unidades de control son:

- **160 °C** para el calentamiento, acercándose lo máximo posible a la temperatura de transición vítrea del material, para que de esta forma la viscosidad sea lo más baja posible, y por tanto, el fundido polimérico fluya lo mejor posible para un correcto llenado de las microcaracterísticas de la pieza. Los canales del inserto de níquel se medirán posteriormente con microscopio para ver si se ha alcanzado una profundidad adecuada.
- **80 °C** para el enfriamiento, disminuyendo de forma brusca la temperatura a la mitad, refrigerando el molde, para poder enfriar la pieza lo antes posible y poder expulsarla del molde sin que se hayan producido deformaciones con un tiempo de ciclo lo más bajo posible.



Fig 53. Temperaturas de calentamiento y enfriamiento fijadas durante la prueba de molde.
Fuente: Elaboración propia.

- **Medidas con microscopio inserto de níquel:**

Seguidamente, como en la prueba anterior, se mide con el **microscopio confocal OLYMPUS BX53** la profundidad a la que se consiguen llenar las microcaracterísticas de la zona del inserto de níquel.

Se recuerda que los objetivos de medida son:

- *Profundidad hueco (eje Z; línea azul) = 15 micrómetros*
- *Ancho hueco (eje X; línea roja) = 80 micrómetros*

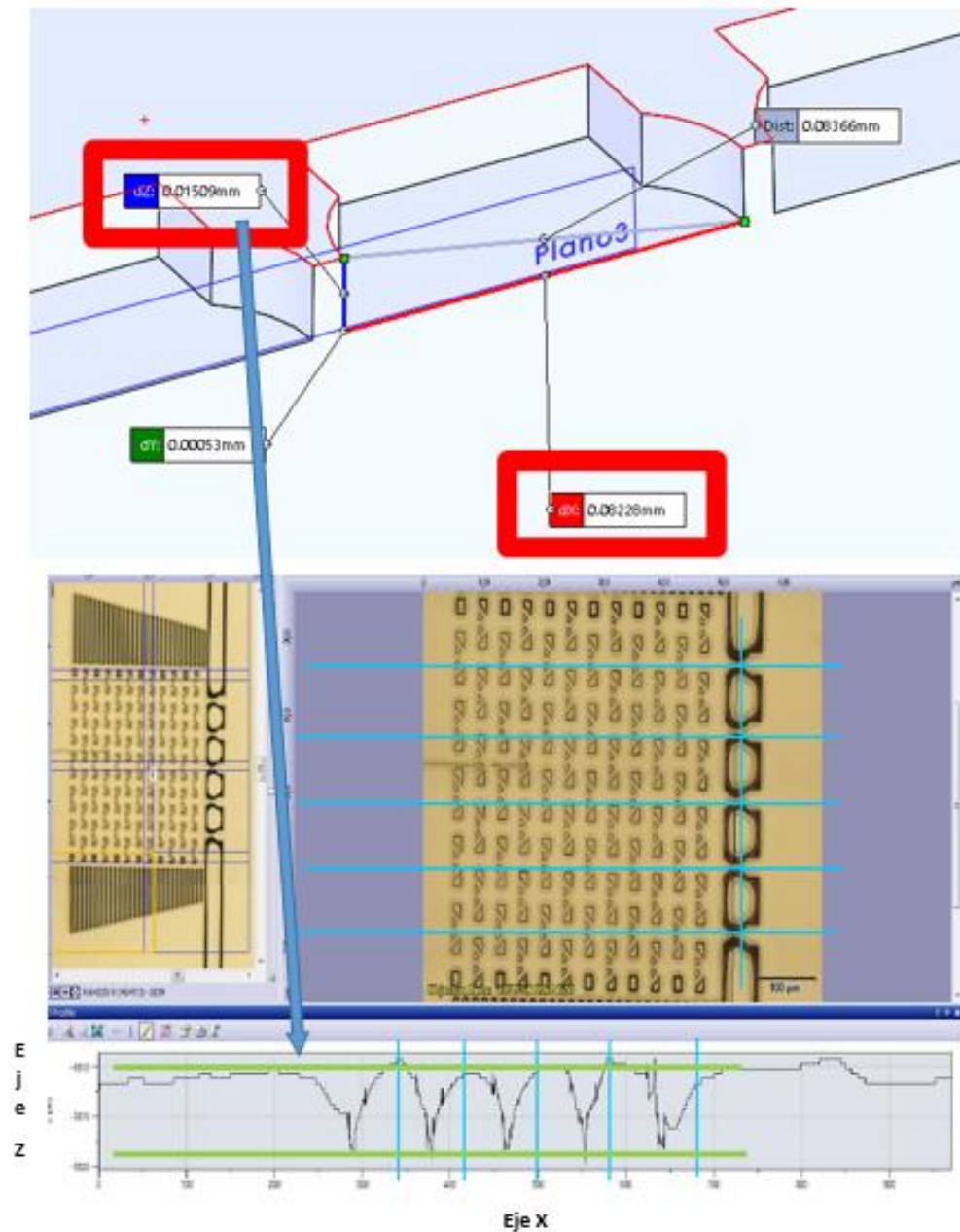


Fig 54. Ampliación de las microestructuras del inserto de la pieza PACHINKO 3D junto con los resultados obtenidos en las medidas con microscopio. Fuente: medidas realizadas por Microliquid.

Los resultados obtenidos en las medidas son los siguientes:

- Profundidad hueco microscopio (eje Z; línea azul) = 10 micrómetros

Esta profundidad es medida, como se ve en la figura 54, en el eje Z entre las dos líneas verdes horizontales (escala en micrómetros).

- Ancho hueco microscopio (eje X; línea roja) = 80 micrómetros

Entonces, a la vista de los resultados, se tiene lo siguiente:

- *Profundidad microscopio* = 10 micras → *Profundidad CAD* = 15 micras
- *Ancho microscopio* = 80 micras → *Ancho CAD* = 80 micras

La comparativa de estos resultados con los de la prueba anterior sin sistema Variotherm (molde aatemperado) son:

- *Profundidad con Variotherm* = 10 micrómetros
- *Profundidad sin Variotherm* = 7,5 micrómetros

La gráfica que se ve en la parte inferior de la figura 54 corresponde a la medida de la profundidad de los canales tras esta prueba de molde. Hay que fijarse en las distancias pico a pico (líneas verdes horizontales), y se ve que la profundidad alcanzada aumenta hasta los **10 micrómetros**, respecto a los **7,5 micrómetros** de las pruebas de molde anteriores. Se puede decir que se consiguen copiar mejor estas microestructuras con el sistema, ya que se evita en cierta medida el efecto de vacilación del plástico fundido, copiando mejor las microestructuras, pero aún queda trabajo hasta llegar a los 15 micrómetros de profundidad teóricas de estos canales.

Cabe destacar también, que el tiempo de ciclo en este caso es de unos **45 segundos**, superior al de las anteriores pruebas de molde (30 segundos). Esto es debido al uso del sistema Variotherm, ya que el molde está a una temperatura superior durante el llenado de la pieza, por lo que el tiempo de enfriamiento de la pieza en el molde es mayor antes de poder ser expulsada, que en este caso ha sido de unos 25 segundos.

4.2 ESTIMACIÓN DE COSTES DE FABRICACIÓN

Además de las pruebas de molde realizadas, como el objetivo final del proyecto sería la industrialización mediante producción en serie, se han realizado unas estimaciones del precio por pieza (Escandallos) para 50000 y 500000 unidades del molde prototipo (utilizado en las pruebas) junto con la amortización del molde. También se ha realizado la estimación del precio por pieza de un posible molde futuro con cuatro cavidades y colada caliente, viendo cómo afectan diferentes aspectos a los costes y amortización del molde, de forma comparativa con el molde prototipo.

Para el cálculo del precio por pieza se han tenido en cuenta los siguientes aspectos:

- Peso pieza + colada.
- Cantidad y precio de materia prima.
- Piezas por caja, cantidad de cajas. cajas por pallet y cantidad de pallets.
- Inyección: máquina inyectora, ciclo inyección, lotes de producción, tasa y eficiencia de máquina y tiempo de recambio de molde.
- Tasa de operario.
- Logística.

- **Molde prototipo:**

Para la amortización del molde prototipo se han tenido en cuenta los siguientes aspectos:

- *Precio molde aproximado = 24000 euros*
- *Precio por pieza (500000 uds.) = $0.53185 \frac{\text{euros}}{\text{pieza}}$*
- *Ganancia por pieza (500000 uds.) = $0.04835 \frac{\text{euros}}{\text{pieza}}$*
- ***Amortización molde = $0.04835 * 500000 = 24175 \text{ euros}$***

- Coste por pieza para 50000 unidades:

Nombre pieza:	PACHINKO	Código molde:	GU19BE	Cliente:	HoliFAB
---------------	----------	---------------	--------	----------	---------

1. MATERIA PRIMA: COC TOPAS 6013

Precio (€/kg)	15	Peso pieza (kg)	0,00136	Peso colada (kg)	0,00084
---------------	----	-----------------	---------	------------------	---------

Precio materia prima por pieza (€/pieza)	$(\text{peso pieza} + \text{peso colada}) * \text{precio} = 0,033$
--	--

2. PROCESO DE INYECCIÓN

Máquina inyec. (MATEU&SOLÉ)	55 Tn	Ciclo inyección (piezas/hora)	80	Cavidades	1
Tasa de máquina (€/hora)	21	Tiempo puesta a punto máquina y molde (horas)	3	Producción (u.)	50000

Precio inyección por pieza (€/pieza)	$\frac{\text{tasa de máquina}}{\text{ciclo inyección}} = 0,2625$
Producción total (horas)	$\frac{\text{producción}}{\text{ciclo inyección}} = 625$

3. OPERARIO DE PRODUCCIÓN

% Operario	100 %	Tasa operario (€/hora)	18	Tasa operario por pieza (€/pieza)	$\frac{\text{tasa operario}}{\text{ciclo inyección}} = 0,225$
------------	-------	------------------------	----	-----------------------------------	---

4. EMBALAJE Y LOGÍSTICA

Precio Pallet europeo (€/u.)	6	Precio Caja cartón 427x287x252 (€/u.)	0,573	Precio Bolsa plástico (€/u.)	0,1
Piezas por bolsa (u.)	30	Bolsas por caja (u.)	83	Piezas por caja (u.)	2500
Cajas por pallet (u.)	10	Piezas por pallet (u.)	25000	Total pallets (u.)	$\frac{\text{producción}}{\text{piezas por pallet}} = 2$

Envío a:	Alemania	Precio por pallet (€/u.)	100
----------	----------	--------------------------	-----

Precio logística total (€)	$\text{precio por pallet} * \text{total pallets} = 200$
Precio logística por pieza (€/pieza)	$\frac{\text{precio logística total}}{\text{producción}} = 0,004$

Precio embalaje por pieza (€/pieza)	0,0037
-------------------------------------	--------

$$\frac{(\text{precio pallet europeo}) + (\text{precio caja cartón}) * (\text{cajas por pallet}) + (\text{precio bolsa plástico}) * (\text{bolsas por caja}) * (\text{cajas por pallet})}{\text{piezas por pallet}} = 0,0037$$

5. PRECIO TOTAL POR PIEZA

Precio materia prima por pieza (€/pieza)+ Precio inyección por pieza (€/pieza)+ Tasa operario por pieza (€/pieza)+ Precio logística por pieza (€/pieza)+ Precio embalaje por pieza (€/pieza)=
=0,033+0,2625+0,225+0,004+0,0037= 0,5282 €/pieza

% ganancia por pieza	10 %	Precio de venta (€)	$0,5282 * 1,1$ = 0,58102
Ganancia por pieza (€)	0,05282	Ganancia total producción (€)	$0,05282 * 50000$ = 2641

Fig 55. Precio/pieza PACHINKO para 50000 uds teniendo en cuenta todos los aspectos influyentes en el proceso para molde prototipo. Fuente: Elaboración propia.

Con una producción de 50000 unidades, se está muy lejos de amortizar el molde. Además, al ser una producción 'pequeña':

- El precio por kilogramo de la materia prima aumenta, ya que se solicita menor cantidad.
- La tasa de máquina aumenta, ya que las horas de producción son muy inferiores respecto a producir 500000 unidades, por lo que el precio de la inyección aumenta, de modo que el precio por pieza en este caso será algo superior al siguiente, al ser la parte de la inyección la más importante.

- Coste por pieza para 500000 unidades:

Nombre pieza:	PACHINKO	Código molde:	GU19BE	Cliente:	HoliFAB
---------------	----------	---------------	--------	----------	---------

1. MATERIA PRIMA: COC TOPAS 6013

Precio (€/kg)	12	Peso pieza (kg)	0,00136	Peso colada (kg)	0,00084
---------------	----	-----------------	---------	------------------	---------

Precio materia prima por pieza (€/pieza)	$(\text{peso pieza} + \text{peso colada}) * \text{precio}$ $= 0,0264$
--	--

2. PROCESO DE INYECCIÓN

Máquina inyec. (MATEU&SOLÉ)	55 Tn	Ciclo inyección (piezas/hora)	80	Cavidades	1
Tasa de máquina (€/hora)	18	Tiempo puesta a punto máquina y molde (horas)	3	Producción (u.)	500000

Precio inyección por pieza (€/pieza)	$\frac{\text{tasa de máquina}}{\text{ciclo inyección}} = 0,225$
Producción total (horas)	$\frac{\text{producción}}{\text{ciclo inyección}} = 6250$

3. OPERARIO DE PRODUCCIÓN

% Operario	100 %	Tasa operario (€/hora)	18	Tasa operario por pieza (€/pieza)	$\frac{\text{tasa operario}}{\text{ciclo inyección}} = 0,225$
------------	-------	------------------------	----	-----------------------------------	---

4. EMBALAJE Y LOGÍSTICA

Precio Pallet europeo (€/u.)	6	Precio Caja cartón 427x287x252 (€/u.)	0,573	Precio Bolsa plástico (€/u.)	0,1
Piezas por bolsa (u.)	30	Bolsas por caja (u.)	83	Piezas por caja (u.)	2500
Cajas por pallet (u.)	12	Piezas por pallet (u.)	30000	Total pallets (u.)	$\frac{\text{producción}}{\text{piezas por pallet}} = 17$

Envío a:	Alemania	Precio por pallet (€/u.)	100
----------	----------	--------------------------	-----

Precio logística total (€)	$\text{precio por pallet} * \text{total pallets} = 1700$
Precio logística por pieza (€/pieza)	$\frac{\text{precio logística total}}{\text{producción}} = 0,0034$

Precio embalaje por pieza (€/pieza)	0,0037
-------------------------------------	--------

$$\frac{(\text{precio pallet europeo}) + (\text{precio caja cartón}) * (\text{cajas por pallet}) + (\text{precio bolsa plástico}) * (\text{bolsas por caja}) * (\text{cajas por pallet})}{\text{piezas por pallet}} = 0,0037$$

5. PRECIO TOTAL POR PIEZA

Precio materia prima por pieza (€/pieza)+ Precio inyección por pieza (€/pieza)+ Tasa operario por pieza (€/pieza)+ Precio logística por pieza (€/pieza)+ Precio embalaje por pieza (€/pieza)=
=0,0264+0,225+0,225+0,0034+0,0037= 0,4835 €/pieza

% ganancia por pieza	10 %	Precio de venta (€)	$0,4835 * 1,1 = 0,53185$
Ganancia por pieza (€)	0,04835	Ganancia total producción (€)	$0,04835 * 500000 = 24175$

Fig 56. Precio/pieza PACHINKO para 500000 uds teniendo en cuenta todos los aspectos influyentes en el proceso para molde prototipo. Fuente: Elaboración propia.

En este caso, con una producción de 500000 unidades, ocurre que:

- El precio por pieza, como se ha comentado en el anterior caso, es algo inferior respecto a la producción de 50000 unidades, debido principalmente a la reducción de la tasa de máquina, que disminuye el coste de la parte de inyección y la reducción del precio por kilogramo de la materia prima.
- En este caso, sí que se amortiza el molde, ya que la cantidad de piezas a producir ya es considerable.

Por tanto, el molde prototipo se consigue amortizar con una producción de 500000 unidades, pero este molde, usado en las pruebas, resulta poco rentable para producir en serie, debido a:

- Es un molde de una cavidad, con un ciclo de inyección de unos 45 segundos, algo elevado, por lo que la cantidad de piezas producidas por hora es reducida.
- El molde tiene colada fría, por lo que en cada pieza se desperdicia una cierta cantidad de material.

- **Molde ‘futuro’:**

Por estas razones, se propone un posible molde futuro para producir en serie con las siguientes características:

- Molde de cuatro cavidades, por lo que ahora, para cada ciclo de inyección (45 segundos), se producen cuatro piezas, no una como en el caso del molde prototipo.
- Molde con colada caliente, es decir, se desperdicia menor cantidad de material por pieza.
- El ciclo de inyección es el mismo que en el molde prototipo, pero el coste de fabricación de este molde, es aproximadamente el triple del molde prototipo.

Para la amortización del molde ‘futuro’ se han tenido en cuenta los siguientes aspectos:

- *Precio molde aproximado = 72000 euros*
- *Precio por pieza (5000000 uds.) = $0.2116 \frac{\text{euros}}{\text{pieza}}$*
- *Ganancia por pieza (5000000 uds.) = $0.019245 \frac{\text{euros}}{\text{pieza}}$*
- ***Amortización molde = $0.019245 * 5000000 = 96225 \text{ euros}$***

Es lógico que el coste por pieza en este caso disminuya de forma considerable, por lo que, para amortizar el molde, será necesaria una producción en serie de varios millones de piezas (5000000 unidades).

- **Coste por pieza para 5000000 unidades:**

Nombre pieza:	PACHINKO	Código molde:	GU19BE	Cliente:	HoliFAB
----------------------	----------	----------------------	--------	-----------------	---------

1. MATERIA PRIMA: COC TOPAS 6013

Precio (€/kg)	12	Peso pieza (kg)	0,00136	Peso colada (kg)	0
----------------------	----	------------------------	---------	-------------------------	---

Precio materia prima por pieza (€/pieza)	$(\text{peso pieza} + \text{peso colada}) * \text{precio} = 0,017$
---	--

2. PROCESO DE INYECCIÓN

Máquina inyec. (MATEU&SOLÉ)	55 Tn	Ciclo inyección (piezas/hora)	80	Cavidades	4
Tasa de máquina (€/hora)	18	Tiempo puesta a punto máquina y molde (horas)	3	Producción (u.)	5000000

Precio inyección por pieza (€/pieza)	$\frac{\text{tasa de máquina}}{\text{ciclo inyección}} = 0,05625$
Producción total (horas)	$\frac{\text{producción}}{\text{ciclo inyección}} = 15625$

3. OPERARIO DE PRODUCCIÓN

% Operario	200 %	Tasa operario (€/hora)	18	Tasa operario por pieza (€/pieza)	$\frac{\text{tasa operario}}{\text{ciclo inyección}} = 0,1125$
------------	-------	------------------------	----	-----------------------------------	--

4. EMBALAJE Y LOGÍSTICA

Precio Pallet europeo (€/u.)	6	Precio Caja cartón 427x287x252 (€/u.)	0,573	Precio Bolsa plástico (€/u.)	0,1
Piezas por bolsa (u.)	30	Bolsas por caja (u.)	83	Piezas por caja (u.)	2500
Cajas por pallet (u.)	12	Piezas por pallet (u.)	30000	Total pallets (u.)	$\frac{\text{producción}}{\text{piezas por pallet}} = 167$

Envío a:	Alemania	Precio por pallet (€/u.)	100
----------	----------	--------------------------	-----

Precio logística total (€)	$\text{precio por pallet} * \text{total pallets} = 16700$
Precio logística por pieza (€/pieza)	$\frac{\text{precio logística total}}{\text{producción}} = 0,003$

Precio embalaje por pieza (€/pieza)	0,0037
-------------------------------------	--------

$$\frac{(\text{precio pallet europeo}) + (\text{precio caja cartón}) * (\text{cajas por pallet}) + (\text{precio bolsa plástico}) * (\text{bolsas por caja}) * (\text{cajas por pallet})}{\text{piezas por pallet}} = 0,0037$$

5. PRECIO TOTAL POR PIEZA

Precio materia prima por pieza (€/pieza)+ Precio inyección por pieza (€/pieza)+ Tasa operario por pieza (€/pieza)+ Precio logística por pieza (€/pieza)+ Precio embalaje por pieza (€/pieza)=
=0,017+0,05625+0,1125+0,003+0,0037= 0,19245 €/pieza

% ganancia por pieza	10 %	Precio de venta (€)	$0,19245 * 1,1 = 0,2116$
Ganancia por pieza (€)	0,019245	Ganancia total producción (€)	$0,019245 * 5000000 = 96225$

Fig 57. Precio/pieza PACHINKO molde 'futuro' para 5000000 uds teniendo en cuenta todos los aspectos influyentes en el proceso. Fuente: Elaboración propia

5. RESUMEN, CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

En este trabajo fin de grado, se han realizado las siguientes actividades:

- Se ha estudiado e investigado sobre la inyección de plásticos convencional, microinyección de plásticos, tecnología Variotherm y su estado actual, posibles materiales a utilizar y material empleado, máquina de inyección utilizada, molde utilizado y especificaciones a conseguir en la pieza.
- Tras ello, en el seno de un proyecto industrial prefijado, se han realizado distintas pruebas de molde o ensayos con diferentes objetivos en cada una de ellas, siendo los aspectos más importantes:
 - o El correcto uso y control de los parámetros de inyección para que la pieza tenga los mínimos defectos posibles.
 - o Conseguir la mejor estética posible en la pieza, traducido en una transparencia lo más elevada posible (90%).
 - o Implantación y correcto uso del sistema Variotherm.
 - o Medida con microscopio confocal de los huecos micrométricos del inserto de níquel, realizando un análisis comparativo de la profundidad de llenado alcanzada por el plástico con y sin uso de la tecnología Variotherm.
- También se ha realizado una simulación del llenado de la pieza con el programa Moldex3D, analizado las etapas y parámetros de inyección más influyentes sobre la pieza, para poder entender de una mejor manera las pruebas de molde reales.

Los resultados obtenidos, respecto a los objetivos planteados, han sido los siguientes:

- Se ha conseguido una pieza prácticamente sin defectos de inyección.
- Se ha alcanzado una transparencia en la pieza considerablemente alta, entre un 80-90 %.
- Mediante el análisis comparativo de las medidas con microscopio, se ha conseguido aumentar la profundidad de llenado del plástico en los canales del inserto de 7,5 a 10 micrómetros, gracias al uso de la tecnología Variotherm.
- A pesar de no haber alcanzado los 15 micrómetros de profundidad planteados al principio del proyecto, se ha alcanzado una profundidad considerable, suficiente para que las CTC se depositen en los huecos y puedan ser detectadas.

Por tanto, los resultados finalmente han sido positivos y se ha cumplido el objetivo de presentar un proyecto viable para una producción futura. Se está a la espera de nuevas pruebas por parte de los promotores del proyecto.

Para concluir, ha resultado una investigación muy interesante y gratificante personalmente, mediante el aprendizaje en el campo de la inyección de plásticos y pudiendo llevar a cabo un proyecto que puede ayudar a la detección prematura del cáncer y, de esta forma, avanzar y ayudar en el campo de la salud.

Respecto a las líneas futuras de trabajo, se seguirá investigando sobre el tema y realizando pruebas de molde para poder alcanzar una profundidad de llenado lo mayor posible. Pero, como se ha comentado, los resultados en este proyecto han sido positivos, a pesar de no haber alcanzado la profundidad deseada.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. Gómez, C. O. (Enero de 2010). *Células tumorales circulantes: aislamiento, cuantificación y relevancia de su traslación a la práctica asistencial*. Actas Urológicas Españolas.
https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0210-48062010000100002
2. EINA. (2019). *Objetivos de desarrollo sostenible agenda 2030*.
<https://eina.unizar.es/sites/eina.unizar.es/files/archivos/Calidad/ODS/ods.pdf>
3. Puértolas, J. A., Ríos, R., & Castro, M. (2016). *Tecnología de los materiales en ingeniería*. Zaragoza. Ed: Síntesis.
4. Martí, E. B. (24 de Febrero de 2021). *Proceso de inyección en el plástico*.
<https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/326284-Proceso-de-inyeccion-en-el-plastico.html>
5. Tecnología de los plásticos.(13 de junio de 2011). *Inyección de materiales plásticos II*.
<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/inyeccion-de-materiales-plasticos-ii.html>
6. Instituto Asteco. (2020). *Curso de selección de aceros para moldes*.
<http://institutoasteco.com/disponibles/Curso-16-seleccion-de-aceros-para-moldes/#/1>
7. Attia, U., Marson, S., & Alcock, J. (2014). *Micro-injection moulding of polymer microfluidic devices*.
https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/handle/1826/4331/Micro_injection_moulding.pdf?sequence=1&isAllowed=y
8. Sanchez, R., Mercado, D., & Aísa, J. (2016). *Estudio teórico experimental de la inyección con regulación de temperatura de molde (tecnología "heat&cool")*.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=203000>
9. Neto, V., & Oliveira, M. (Marzo de 2012). *Microinjection Molding of Enhanced Thermoplastics*.
https://www.researchgate.net/publication/224829338_Microinjection_Molding_of_Enhanced_Thermoplastics
10. Gilchrist, M., Zhang, N., & Su, Q. (2015). *The use of variotherm system for microinjection molding*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/app.42962>
11. Wittmann. (2020). *VARIOTHERM technology*. <https://www.wittmann-group.com/es/bfmoldr-variotherm-technology>
12. HB-THERM. (2019). *HB THERM. THERMO-5*. <https://pdf.directindustry.es/pdf/hb-therm/thermo-5/20504-882861.html>

13. Tecnología de los plásticos. (29 de Junio de 2013). *Microinyección: materiales*. <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2013/06/microinyeccion-materiales.html>
14. TOPAS Advanced Polymers. (2020). *Cyclic Olefin Copolymer*. <https://documentcloud.adobe.com/link/review?uri=urn:aaid:scds:US:727deee4-f0e3-4bed-9371-060ea7b5e51e>
15. TOPAS Advanced Polymers. (2019). *Processing conditions for injection molding TOPAS 6013M*. <https://topas.com/sites/default/files/PDS%20Topas%206013M-07.pdf>
16. Gastrow, H. (1998). *Moldes de inyección para plásticos: 100 casos prácticos*. Munich. Ed: Hanser.
17. Protolabs. (3 de Marzo de 2020). *Ángulo de desmoldeo*. <https://www.protolabs.es/recursos/insight/angulo-de-desmoldeo/>
18. Mercado, D., Serraller, F., Aísa, J., & Clavería, I. (Noviembre de 2010). El diseño de moldes precisa una concepción integral. *Revista de plásticos modernos*, vol. 100.
19. Garijo, J. A. (2007). *Inyección de termoplásticos*. <http://www.mailxmail.com/curso-inyeccion-termoplasticos/molde-partes-basicas>
20. GERMAN SPECIAL STEEL. (2020). *Acero 1.2085 ficha técnica*. <https://www.gss-spain.com/es/productos/productos-shg/aceros-de-herramientas/1-2085-aisi-420fm.html>
21. ROVALMA THE STEEL INNOVATOR. (2020). *FASTCOOL*. <https://rovalma.com/products-t>
22. Guzmán, D. (8 de Julio de 2020). *Fotolitografía, la técnica que utilizamos en la fabricación de dispositivos y circuitos integrados*. <https://cuartoslimpiosmexico.com/https-cuartoslimpiosmexico-com-fotolitografia-la-tecnica-que-utilizamos-en-la-fabricacion-de-dispositivos-y-circuitos-integrados->
23. OMEGA. (2020). *¿Qué es un sensor termopar?* <https://es.omega.com/prodinfo/termopares.html>
24. MATEU&SOLÉ. (2015). *Máquinas de moldeo por inyección*. Inyectoras.
25. Moldblade. (2021). *Inyección de materiales plásticos: principales defectos en las piezas inyectadas*. <https://moldblade.com/inyeccion-de-plastico-principales-defectos-en-las-piezas-inyectadas/>
26. Castany, F. J., Aísa, J., & Martínez, A. (2013). *Diseño y desarrollo de componentes de plástico inyectados (I): el material*. Zaragoza. Ed: Prensa universitaria de Zaragoza.
27. Olympus. (2020). *BX 53. Sistema de microscopio*. [https://www.olympus-lifescience.com/es/microscopes/upright/bx53f2/#!cms\[focus\]=cmsContent5656](https://www.olympus-lifescience.com/es/microscopes/upright/bx53f2/#!cms[focus]=cmsContent5656)

7. ANEXOS

ANEXO I: SIMULACIÓN DEL LLENADO DE LA PIEZA

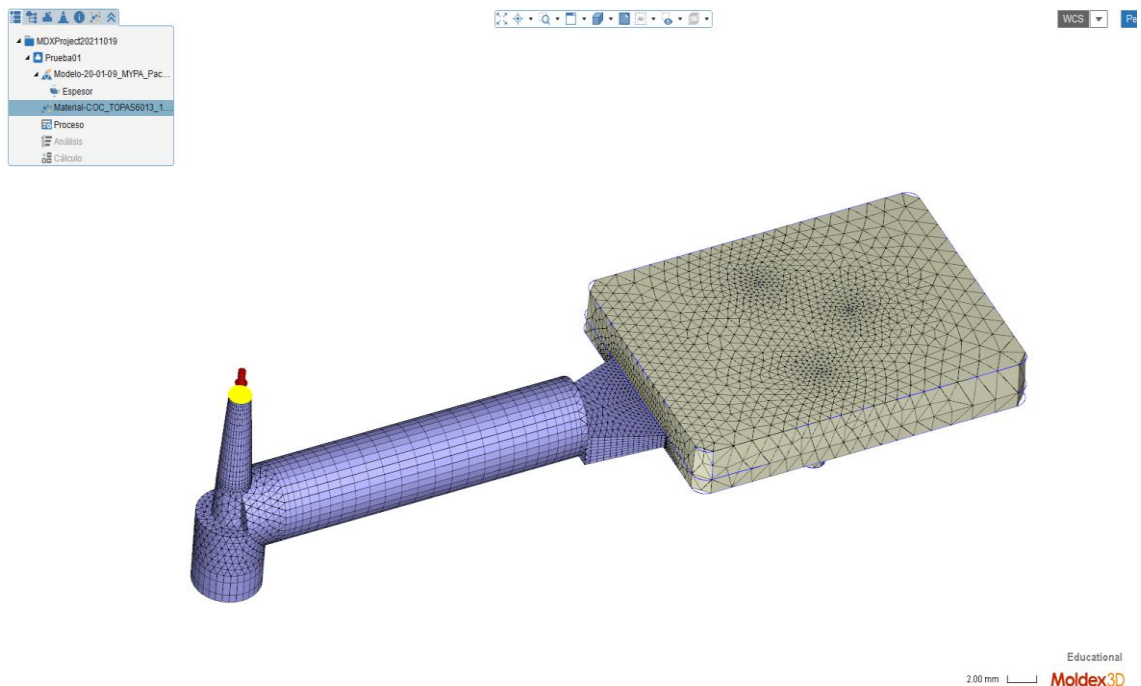
Se realiza una simulación del llenado de la pieza junto con la colada sin el inserto de níquel con el programa Moldex3D programando los parámetros de inyección utilizando el material que se emplea en la pruebas de molde reales (**COC TOPAS 6013**).

Esta simulación tiene como objetivo:

- Aprender el manejo del programa Moldex3D, el cual es interesante para la realización de simulaciones de piezas de plásticos inyectadas.
- Ver cómo se comporta la pieza durante la etapa de compactación, donde se analizan los distintos valores de presión y temperatura en diferentes zonas de la pieza en tiempos distintos de esta etapa.
- Aplicar distintas temperaturas de molde de manera comparativa, donde se analiza cómo se transmite la presión en la etapa de compactación en distintas zonas de la pieza y el efecto de la temperatura en esta etapa, prediciendo distintos defectos que podrían producirse.

La simulación se realiza siguiendo los siguientes pasos:

- Primero, se dibuja la pieza junto con la colada con las medidas teóricas reales de pieza y colada, para obtener una pieza idéntica a la real y realizar una simulación lo más exacta posible.
- A continuación, se pasa al mallado de la figura, el cual es un paso crucial en el análisis del diseño. Se realiza con un mallado de un 1 mm.



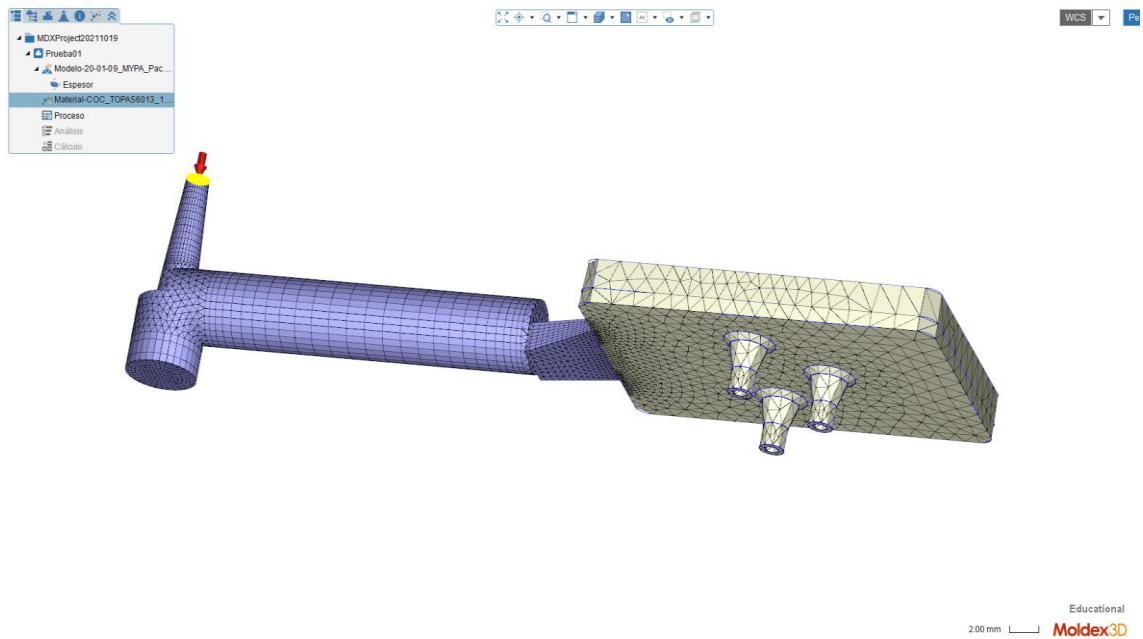


Fig 58. Pieza junto con colada dibujada y mallada. Fuente: Elaboración propia.

- Seguidamente, se selecciona el material con el que se desea realizar el llenado, que en este caso es el **COC TOPAS 6013M**. El programa, al elegir el material deseado, recomienda los valores a los que se deben programar los diferentes parámetros de las distintas etapas del proceso.

Estos valores, en cada etapa, son:

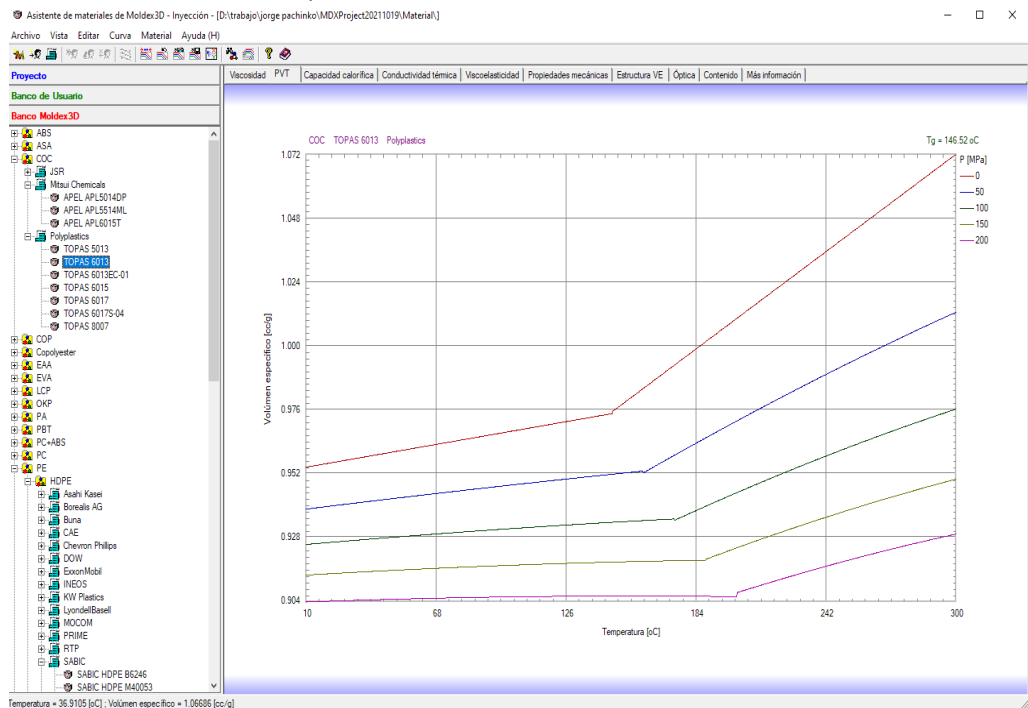


Fig 59. Curvas PvT COC TOPAS 6013M. Fuente: Elaboración propia.

- **Fase de dosificación:**

- *Dosis = 98% cavidad*
- *Contrapresión = 15 bar*
- Perfil temperaturas cilindro:
Zona 1 = 240 °C
Zona 2 = 250 °C
Zona 3 = 255 °C
Zona 4 = 260 °C

- **Fase de llenado:**

- *Tiempo de llenado = 0,1 segundos*
- *Velocidad de inyección = 150 mm/segundo*
- *Presión de inyección = 120 bar*

- **Fase de compactación:**

- *Tiempo de compactación = 4,19 segundos*
- *Presión de compactación = 115 bar*

- **Fase de enfriamiento:**

- *Tiempo de enfriamiento = 18 segundos*

- Una vez realizada la introducción de los valores de los parámetros de inyección, se procede a la simulación del llenado de la pieza:

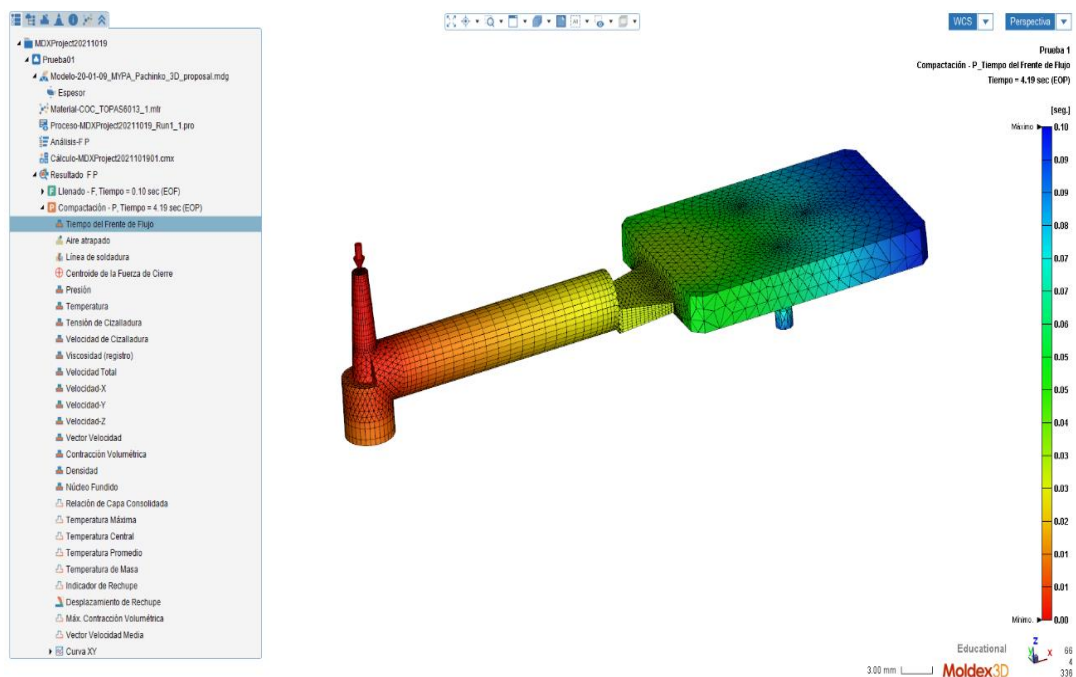


Fig 60. Fase de llenado de la pieza. Tiempo del frente de flujo. Fuente: Elaboración propia.

El tiempo de llenado de la pieza, como se indica en la parte de programación de parámetros, es de 0,1 segundos. La entrada del plástico fundido se observa en la figura 60, mediante una flecha roja. La escala de la derecha de la figura 60 indica los instantes de tiempo por donde fluye el plástico mientras llena la pieza.

- **Análisis de los resultados:**
- A continuación, con una temperatura de molde de **110 °C**, se analiza la etapa de compactación en tiempos distintos de la misma:

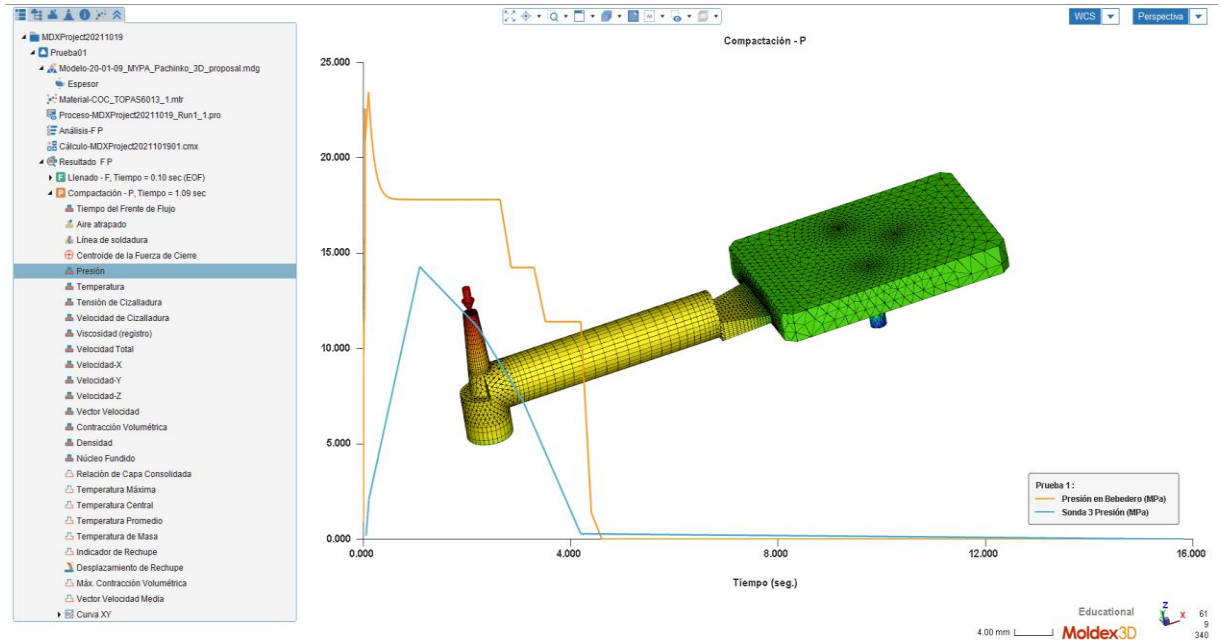


Fig 61. Distribución de presiones en el instante inicial de la fase de compactación (1 segundo).
Fuente: Elaboración propia.

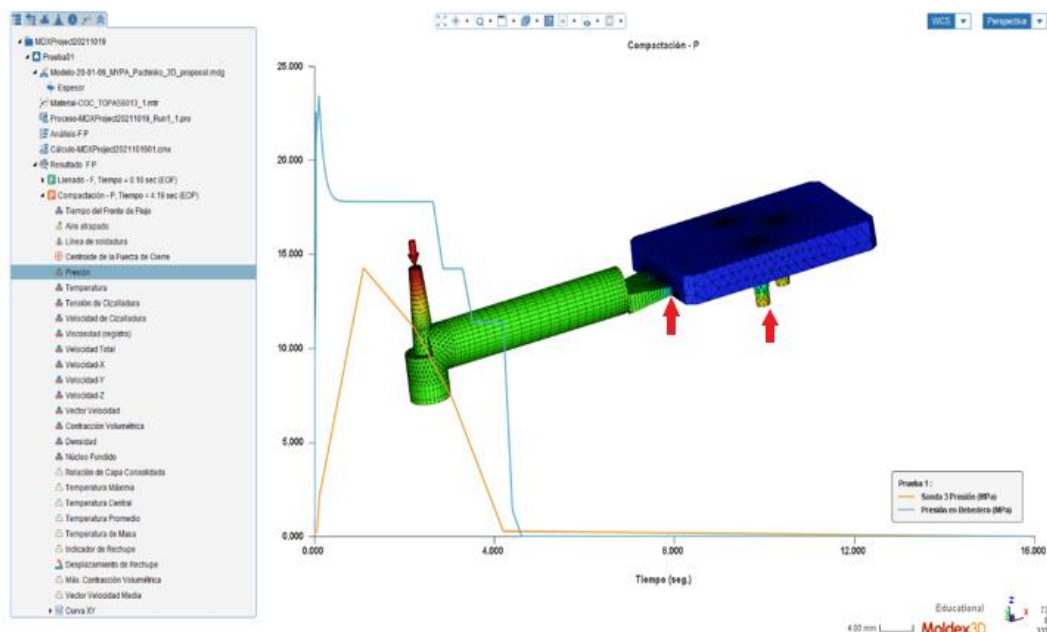


Fig 62. Distribución de presiones en el instante final de la fase de compactación (4,19 segundos). Fuente: Elaboración propia.

En la figura 61, se está en el instante inicial de la fase de compactación. El plástico empieza a contraer en el interior de la cavidad del molde, a una temperatura aún elevada. Debido a esto, el material que se introduce por la entrada a una presión, que es controlada, para terminar de llenar la cavidad, transmite esta presión incluso a las zonas más alejadas de la entrada, buscando una contracción uniforme. Esto es posible debido a que ninguna zona de la pieza ha solidificado aún, permitiendo la entrada de material y transmitiendo la presión.

En la figura 62, se está en el instante final de la fase de compactación. El plástico está ahora a menor temperatura, ya que con el paso del tiempo, todas las zonas de la pieza han sufrido una mayor contracción. Las zonas más restrictivas al paso del plástico, es decir, las zonas de menor espesor, son las que enfrían y solidifican antes. En el caso que se analiza, las zonas más restrictivas son las indicadas con dos flechas ascendentes en la figura 62.

En este instante, la transmisión de presión a las zonas más alejadas de la entrada es mucho menor, ya que la zona de entrada en abanico a la pieza (sin colada), está a una temperatura mucho menor que al inicio de la compactación, por lo que la presión transmitida a las zonas más alejadas disminuye.

En la zona de la pieza (sin colada) de mayor espesor, se observa que la presión es muy baja, ya que tarda más en enfriar y la temperatura en su interior es aún elevada. Sin embargo, en la zona de la pieza (sin colada) correspondiente a las 'tres torres salientes', de menor espesor que el resto de la pieza, se observa que la presión es más alta, ya que la temperatura en esta zona es muy baja, debido a que enfría antes.

- Ahora, se analiza la fase de compactación en su instante final con dos temperaturas de molde distintas, 110 y 50 °C, respectivamente:

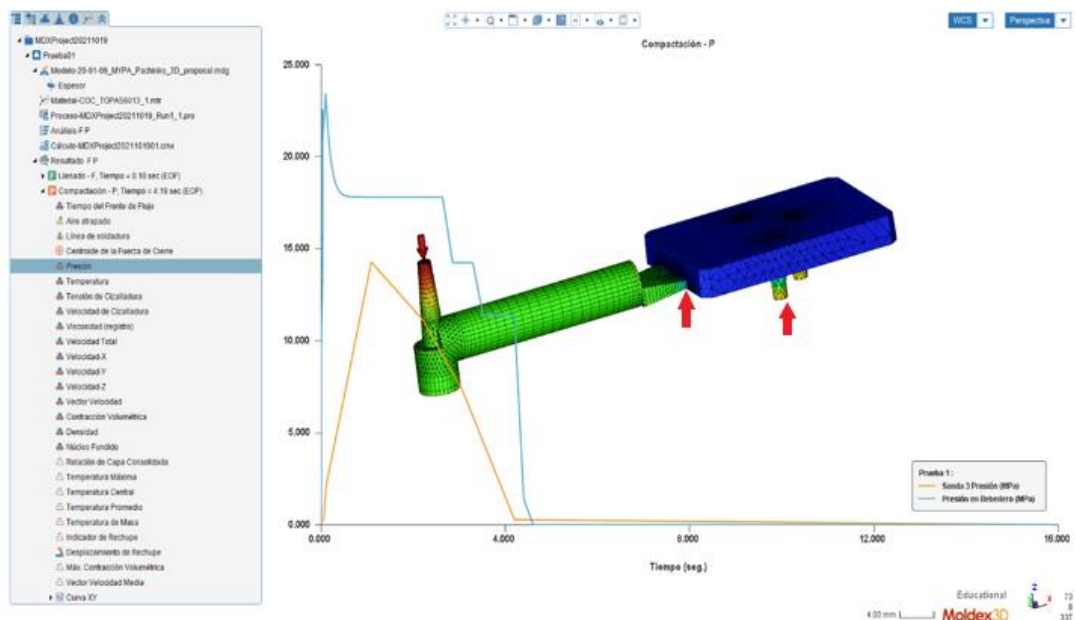


Fig 63. Distribución de presiones en el instante final de la fase de compactación (4,19 segundos) con una temperatura de molde de 110 °C. Fuente: Elaboración propia.

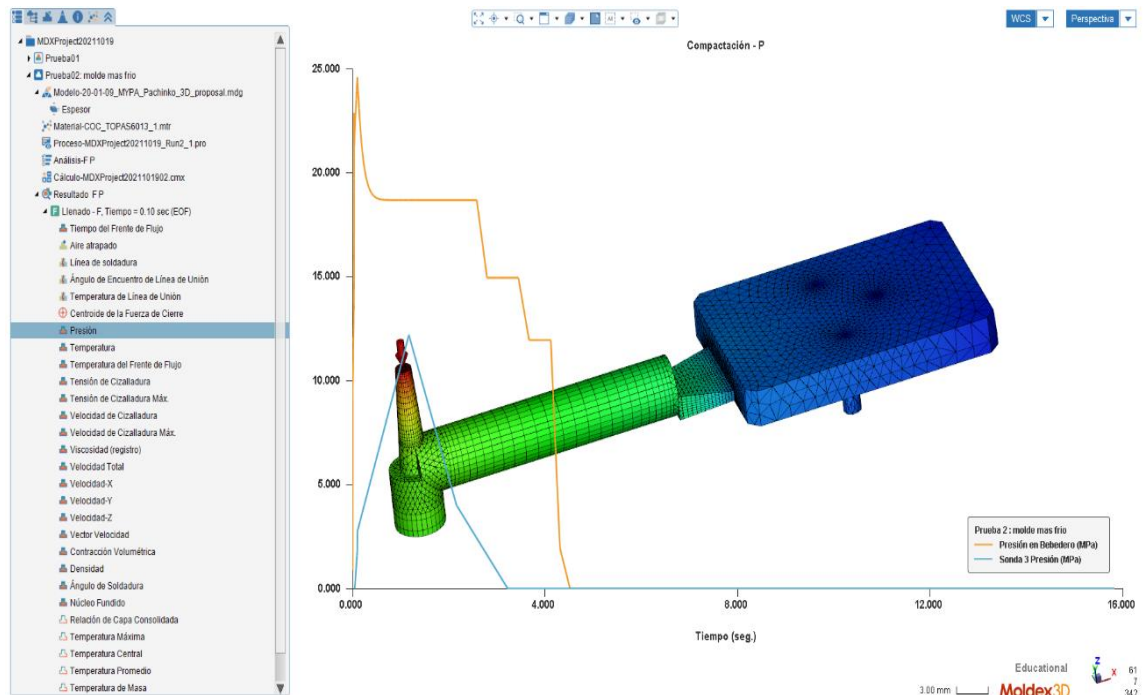


Fig 64. Distribución de presiones en el instante final de la fase de compactación (4,19 segundos) con una temperatura de molde de 50 °C. Fuente: Elaboración propia.

○ **Análisis comparativo:**

En la figura 64, correspondiente a una temperatura de molde de 50 °C, se observa que la transmisión de presión a las zonas de la pieza más alejadas de la entrada de material es prácticamente nula, debido a que la temperatura de molde es demasiado baja y las zonas más restrictivas al paso del plástico han solidificado completamente, impidiendo el paso de material, y por tanto, la transmisión de presión.

En la figura 63, en cambio, se tiene una temperatura de molde más alta, por lo que las zonas más restrictivas al paso del plástico no han solidificado completamente. Entonces, sigue entrando material a la pieza, por lo que se sigue transmitiendo presión a las zonas más alejadas de la entrada de material, como se observa en las ‘tres torres salientes’ de la pieza.

- Finalmente, se realiza una comparativa al final de la fase de compactación de la distribución de temperaturas de la pieza, con el molde a 110 y 50 °C:

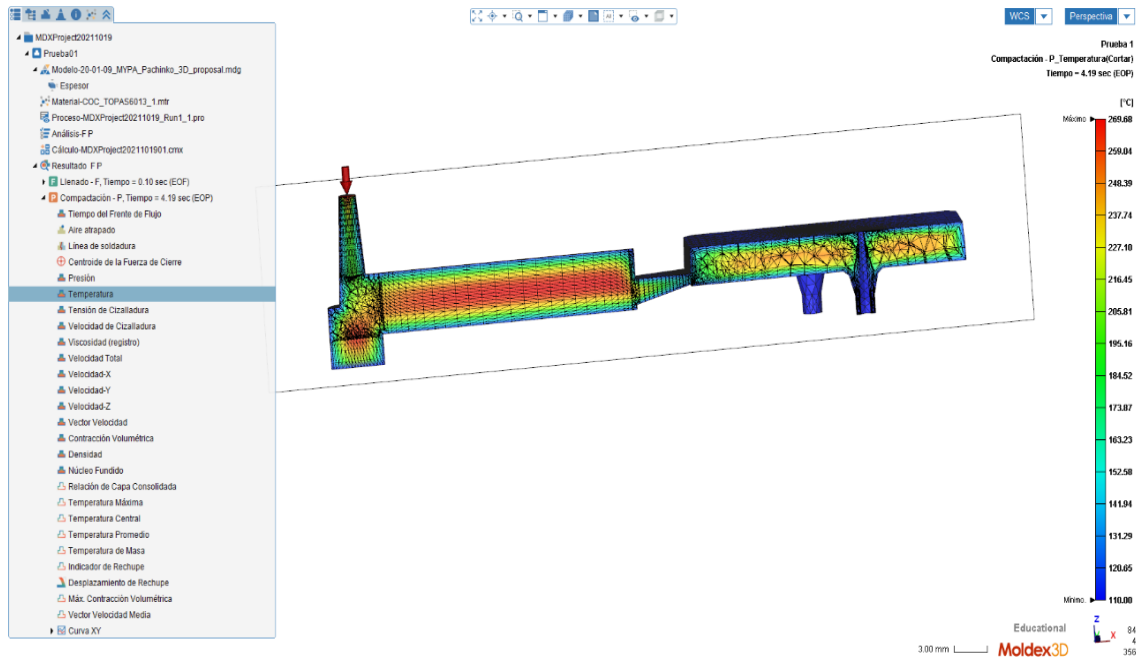


Fig 65. Distribución de temperaturas en el instante final de la fase de compactación (4,19 segundos) con una temperatura de molde de 110 °C. Fuente: Elaboración propia.

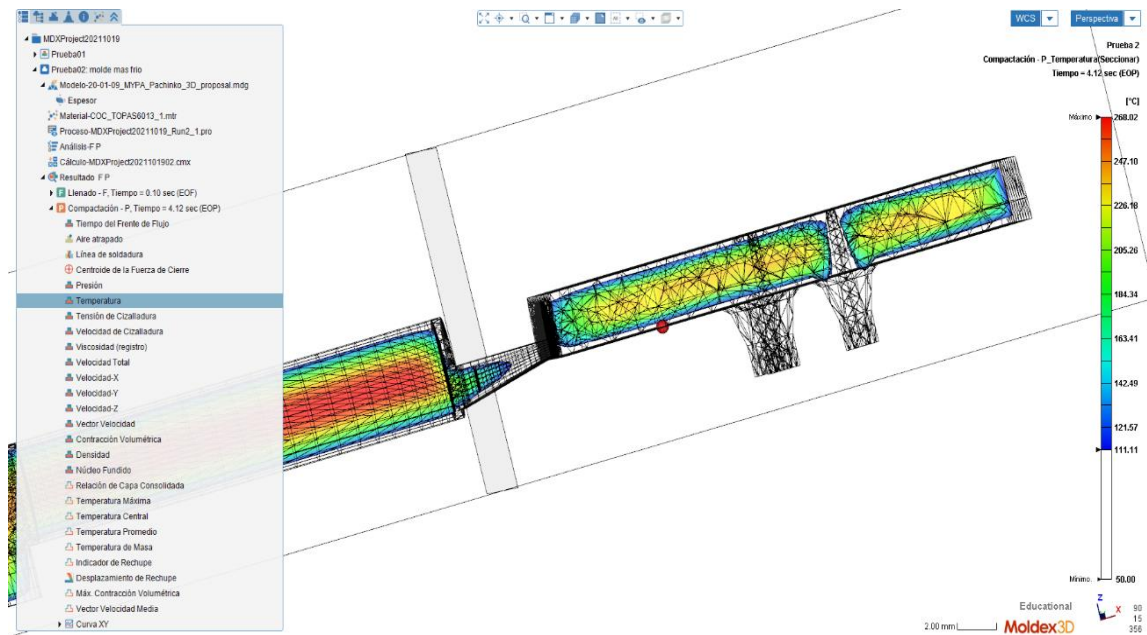


Fig 66. Distribución de temperaturas en el instante final de la fase de compactación (4,19 segundos) con una temperatura de molde de 50 °C. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 66, la capa exterior de la pieza está entre 50 y 110 °C de la escala mostrada. Se ajustan las escalas de ambas figuras para realizar una comparativa adecuada.

Se observa en ambas figuras que las temperaturas más bajas se encuentran en las zonas superficiales de la pieza, ya que son las primeras en comenzar a enfriar, y en las zonas de menor espesor, que son las más rápidas en empezar a contraer, como las torres salientes.

- **Análisis comparativo:**

Con el molde a 50 °C, el enfriamiento de la pieza es más rápido, pero al estar a una temperatura menor, cuando el plástico entre en contacto con las paredes de la cavidad, solidifica en menor tiempo, pudiendo dar lugar a llenados incompletos de la cavidad.

Con el molde a 110 °C, el enfriamiento es más lento, pero al estar a mayor temperatura, el plástico tarda más en solidificar al entrar en contacto con la cavidad, permitiendo un mejor llenado de la cavidad. Además, en este caso, la contracción es más uniforme, permitiendo desmoldeos correctos y reduciendo las deformaciones.

ANEXO II: MICROSCOPIO OLYMPUS BX53

El microscopio de polarización Olympus BX53 ofrece un rendimiento superior en aplicaciones de luz polarizada mediante la combinación del sistema óptico de corrección infinita UIS2 y un diseño óptico exclusivo. Una amplia línea de compensadores compatibles dota al microscopio de polarización BX53-P de versatilidad suficiente para controlar las observaciones y aplicaciones de medición en prácticamente cualquier campo.

Maximizar las ventajas de la corrección infinita permite que el sistema óptico UIS2 prevenga el deterioro del rendimiento del microscopio, incluso cuando en la trayectoria de la luz se introducen accesorios de polarización como analizadores o placas retardadoras. El microscopio BX53 también acepta accesorios intermedios, como cámaras y sistemas de creación de imágenes [27].



Fig 67. Microscopio olympus BX53. Fuente: tomado de [27].

- Características Microscopio Olympus BX53 [27]:

- **Dimensiones (ancho x largo x alto):** 274,5 mm × 614 mm × 469 mm.
- **Peso:** 21 Kg.
- **Entorno operativo:** uso en interiores.
 - **Rango de temperaturas:** de 5 a 40 °C
 - **Humedad relativa máxima:** 80% hasta 31 °C, disminuyendo linealmente a 70% en 34 °C, hasta 50% en 40 °C.
 - **Fluctuaciones de la tensión de alimentación:** +-10%.
- **Aumento total:** 100X (hasta 100 veces).

Con este microscopio se adquieren imágenes precisas gracias al uso de los objetivos Xline, que combinan una planitud mejorada, apertura numérica y aberración cromática para ofrecer imágenes claras en alta resolución con una precisión del color mejorada en todo el espectro. La eliminación de la aberración del color violeta crea blancos claros y rosas vivos, mejorando el contraste y la nitidez.

Además, se utiliza luz LED de gran claridad desarrollada para patología y laboratorio. Con características espectrales similares a las de las fuentes de luz halógenas, el iluminador LED permite visualizar los colores morado y rosa en aplicaciones de investigación clínica, al mismo tiempo que el usuario se beneficia de la larga vida útil del LED.



Fig 68. Comparativa de la luz LED utilizada en el microscopio frente a la utilizada comercialmente. Fuente: tomado de [27].

También tiene un procesamiento digital de imágenes, que permite simplificar el trabajo. De la investigación avanzada a la captura de imágenes para conferencias, estas cámaras microscópicas digitales y el software de creación de imágenes cellSens garantizan una creación de imágenes por fluorescencia con una óptima relación señal-ruido [27].

Por todas estas razones, el uso de este microscopio es ideal para el proyecto.

ANEXO III: HOJAS DE CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL COC TOPAS 6013


TECHNICAL DATA SHEET			
			
TOPAS® 6013M-07			
Cyclic Olefin Copolymer (COC)			
Grade for blow molding and injection molding with high heat resistance, high purity and improved processing behaviour.			
Property	Value	Unit	Test Standard
Physical Properties			
Density	1020	kg/m³	ISO 1183
Melt volume rate (MVR) (260°C, 2.16kg)	13	cm³/10min	ISO 1133
Water absorption (23°C-sat)	0,01	%	ISO 62
Mechanical Properties			
Tensile modulus (1mm/min)	2900	Mpa	ISO 527-3
Tensile stress at break (5mm/min)	63	Mpa	ISO 527-3
Tensile strain at break (5mm/min)	2,6	%	ISO 527-3
Charpy impact strength @ 23°C	14,00	KJ/m²	ISO 179/1eU
Charpy notched impact strength @ 23°C	1,7	KJ/m²	ISO 179/1eA
Thermal Properties			
Glass transition temperature (10°C/min)	142	°C	ISO 11357-1,-2,-3
DTUL @ 0.45 MPa	130	°C	ISO 75-1, -2
Optical Properties			
Deg. of light transmission	91	%	ISO 13468-2
Refractive index (589nm, 25°C)	1,53	-	ISO 489

Fig 69. Ficha de datos técnicos material COC TOPAS 6013. Fuente: tomado de [14].


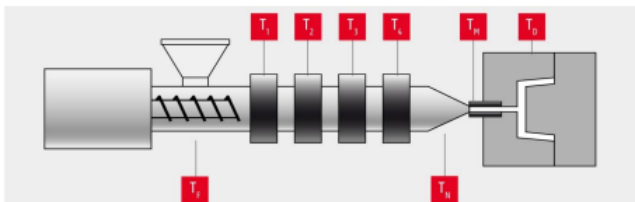
PROCESSING DATASHEET	
	
TOPAS® 6013M-07	
Cyclic Olefin Copolymer	
Processing Conditions for Injection Molding	
	
Processing Temperatures	
T _F	T ₁ T ₂ T ₃ T ₄ T ₅ T ₆ T ₇ T ₈
< 100 °C	230-260 °C 240-270 °C 250-280 °C 260-290 °C 240-300 °C 240-300 °C 95-125 °C
< 212 °F	446-500 °F 464-518 °F 482-536 °F 500-554 °F 464-572 °F 464-572 °F 203-257 °F
Max. Residence Time	< 15 min; short interruption to cycle: reduce T _x = 170 °C 338 °F !
Injection Pressure	P _{inj} = 500 - 1100 bar 7 - 16 kpsi (specific)
Hold on Pressure	P _h = 300 - 600 bar 4 - 9 kpsi (specific)
Back Pressure	P _b = 150 bar 2200 psi max. (specific)
Screw Speed	n _s = 50 - 200 rpm
Injection Speed	moderate to fast (50 mm/sec - 150 mm/sec)
Nozzle Type	free - flow
Note	Shrinkage is dependent on processing conditions and part design. Typical shrinkage values are 0,4 - 0,7%

Fig 70. Ficha de datos del proceso de inyección material COC TOPAS 6013. Fuente: tomado de [15].

