

## Trabajo Fin de Grado

Análisis de la viabilidad del desarrollo de un envase de cuarta gama más sostenible basado en estrategias de reducción de material, utilización de biomateriales y de procesos de baja presión.

Analysis of the feasibility of developing a more sustainable fourth-range packaging based on material reduction strategies, use of biomaterials and low-pressure processes.

Autor/es

**Irene Olarte Martínez**

Director/es

Ángel Fernández Cuello  
Isabel Clavería Ambroj

Titulación del autor

**Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo de Producto**

Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
2023

# ÍNDICE

---

1. OBJETIVOS Y ALCANCE .....	4
2. INTRODUCCIÓN .....	5
3. METODOLOGÍA.....	8
3.1 DIAGRAMA DE TRABAJO .....	8
3.2 PRODUCTO .....	9
3.3 MATERIALES DE ESTUDIO.....	11
3.4 PROCESOS DE FABRICACIÓN .....	12
3.5 SIMULACIÓN.....	13
4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN .....	15
4.1 CONDICIONES ESTÁNDAR DE INYECCIÓN CONVENCIONAL .....	15
4.2 OPTIMIZACIÓN DEL ESPESOR EN INYECCIÓN CONVENCIONAL .....	18
4.3 MODELO PREDICTIVO.....	20
4.4 INY. COMPRESIÓN BASÁNDOSE EN ESTABLECIDOS EN INY. CONVENCIONAL.....	25
4.5 OPTIMIZACIÓN DEL ESPESOR EN INYECCIÓN COMPRESIÓN.....	30
5. CONCLUSIONES .....	35
6. BIBLIOGRAFÍA .....	36
7. ANEXOS.....	39
ANEXO I - DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO, ENVASES DE CUARTA GAMA .....	39
ANEXO II - MATERIALES Y JUSTIFICACIÓN, FICHAS TÉCNICAS.....	47
ANEXO III - DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS DE INYECCIÓN E INYECCIÓN COMPRESIÓN, COMPARATIVA DE CALIDADES.....	71
ANEXO IV – TABLAS COMPLETAS .....	78

## RESUMEN

---

El presente trabajo de Fin de Grado pretende optimizar un envase de IV gama fabricado en inyección desde un punto de vista sostenible, por una parte, analizando la viabilidad de producción en cinco polímeros sostenibles diferentes, y, por otro lado, reduciendo la cantidad de material utilizado en el envase.

En cuanto a los materiales, se analizan dos polipropilenos reciclados, un PHB y dos PLAs, con distintos índices de fluidez. Las ventajas medioambientales de estos polímeros biobasados permiten la biodegradación en el caso del PHB y el biocompostaje en los PLAs.

Asimismo, se estudia minimizar el impacto ambiental mediante la reducción de material del envase, disminuyendo los espesores del mismo para todos los materiales.

Para esta optimización se utilizan procesos de inyección convencional e inyección compresión, verificando los parámetros de entrada y salida. Para la constatación de la viabilidad de los procesos, se utiliza el programa CADMould, realizando simulaciones manuales y un modelo predictivo.

Concluyendo, en base a restricciones de presión máxima y calidad, que la fabricación en inyección compresión permite espesores menores en las piezas, así como unos envases finales con menores tensiones residuales. Se observa, además, que en los polímeros biobasados son necesarios espesores mayores que para la fabricación del envase en polipropileno.

## ABSTRACT

---

This final Project aims to optimize a IV-range packaging manufactured by injection molding from a sustainable point of view, on the one hand, analysing the feasibility of production in five different sustainable materials, and on the other hand reducing the amount of material used in the packaging.

Regarding the materials, two polypropylenes, one PHB and two PLAs are studied, with different melt flow indexes. The environmental advantages of this polymers allow biodegradation of PHB and biocomposting in PLAs.

Moreover, it is studied to minimize the environmental impact by reducing the packaging material, reducing its thickness for all materials.

For this optimization, conventional injection molding and compression injection molding processes are used, verifying input and output parameters. In order to verify the feasibility of processes, it is used CADMould program, performing manual simulations and a predictive model.

In conclusion, based on maximum pressure and quality restrictions, compression injection molding manufacturing allows smaller thicknesses in the pieces, as well as final packages with lower residual stresses. It is also observed that in biobased polymers are necessary greater thicknesses than for the manufacture of polypropylene packaging.

## 1. OBJETIVOS Y ALCANCE

---

Con este trabajo se establecen dos objetivos principales a abordar. En primer lugar, se busca analizar y realizar una comparación de diferentes materiales y tecnologías para optimizar el diseño de un envase de cuarta gama desde el punto de vista de la sostenibilidad y la funcionalidad. Por otra parte, se realiza un modelo predictivo para determinar automáticamente el espesor óptimo de la pared del envase en cada material para el actual proceso de inyección convencional.

En cuanto al alcance del proyecto, se han realizado simulaciones de procesos de inyección e inyección compresión con el programa CADMould. Además de analizar los datos de llenado, también se estudia la calidad de la pieza tras las fases de pospresión y enfriamiento, observando las tensiones residuales y la deformación de esta en las zonas más críticas de diseño. Esto se consigue observando la planitud de la cara superior, así como su redondez, de forma que la fabricación de este envase permita un posterior termosellado en esta cara y que la tapa ensamble de forma óptima.

## 2. INTRODUCCIÓN

---

El problema medioambiental está a la orden del día, cada vez son más los problemas planteados y más necesarias las soluciones a ellos. El ritmo de producción de la sociedad actual ha alcanzado un nivel muy poco sostenible, y con ello la utilización de materias primas.

En un mundo globalizado, en el que los lugares de producción distan de los de consumo, los envases de productos abundan, siendo elementos contaminantes y generando toneladas de residuos, mayormente plásticos. Es por ello por lo que se deben llevar a cabo cambios y rediseños en los productos fabricados con dichos materiales plásticos, desde un prisma respetuoso con el medioambiente y desde la visión que ofrece la economía circular.

La economía circular es un recurso que plantea los problemas mencionados, y que propone una solución global, no solo abordando los procesos de producción, sino también haciendo un cambio a nivel social y de los sistemas económicos actuales. En este modelo, los recursos y materiales ya utilizados vuelven a entrar en la economía, generando una espiral de reciclaje y sostenibilidad.



*Figura 1: Esquema de la economía circular.  
Fuente: Elaboración propia*

En 2020, la Comisión Europea lanzó un plan de acción para la economía circular, en el que se menciona la importancia de los plásticos: “El uso de plásticos biodegradables o compostables, tras una evaluación de las aplicaciones en las que dicho uso pueda ser beneficioso para el medio ambiente, y de los criterios para dichas aplicaciones”.

Esta importante normativa también destaca la importancia de los envases, proponiendo soluciones como “reducir los residuos del envasado (excesivo), mediante la fijación de objetivos y otras medidas de prevención de residuos”, “impulsar el diseño para la reutilización y la reciclabilidad de los envases” o “estudiar la posibilidad de disminuir la complejidad de los materiales de envasado, incluido el número de materiales y polímeros utilizados” [1].

Estos aspectos se reflejan en el trabajo realizado, tanto en sus objetivos como en la metodología seguida. El objetivo principal del trabajo se enfoca en estudiar la viabilidad del rediseño de un envase de cuarta gama más sostenible y la metodología se centra, por una parte, en la sustitución de materiales, utilizando unos biobasados y biocompostables y, por otro lado, en conseguir una reducción de material gracias a procesos de inyección compresión.

Por otro lado, los Objetivos de Desarrollo Sostenible son una serie de metas adoptadas por muchos de los líderes mundiales como parte de la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas [2]. Estos objetivos abarcan problemas sociales y medioambientales, con el fin de erradicar las desigualdades y asegurar el cuidado del planeta.



Figura 2: ODS relacionados con el proyecto.  
Fuente: Elaboración propia partir de los datos de la ONU. [2]

Este trabajo se alinea con cuatro de estos objetivos:

- Nº 7: Energía asequible y no contaminante: Además de centrarse en el acceso a la tecnología por todas las partes del mundo, incluso las más empobrecidas, con este objetivo se busca una solución sostenible de generación de energía, impulsando la eficiencia energética y el uso de fuentes de producción de energía renovables.

Concretamente, con este trabajo se estudian los materiales utilizados desde un punto de vista energético, ya que la producción de estos presenta un porcentaje significativo en la generación de energía actual.

Por ello, además de otras propiedades de sostenibilidad de los polímeros, se debe tener en cuenta que la energía utilizada para su producción sea lo más limpia posible.

- Nº 9: Industria, innovación e infraestructura: La inversión en innovación y desarrollo es cada vez mayor en las empresas. Las inversiones en diseño y desarrollo de productos son prioritarias en las industrias. Asimismo, el rediseño de productos y envases es y debe ser una prioridad para las empresas, teniendo en cuenta las bases del ecodiseño.
- Nº 12: Producción y consumo responsables: En relación con la economía circular mencionada anteriormente, los medios de producción deben ser sometidos a una renovación que asegure una industria sostenible. Donde las materias primas entren en recirculación en la cadena productiva una vez la vida útil de un producto ha finalizado.

Igualmente, el consumo debe ser responsable puesto que de él depende el volumen de producción, así como un correcto reciclado y separación cuando el producto se desecha.

- Nº 13: Acción por el clima: Este objetivo se centra en frenar el cambio climático, que pasa por reducir la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Para ello, y

reuniendo todo lo mencionado anteriormente, es esencial un modelo productivo sostenible, innovar en rediseños centrados en el ecodiseño y utilizar materiales respetuosos con el medioambiente, tanto en su producción como al final de su vida útil.

Respecto al estudio del escenario de vida útil, en los últimos años se han desarrollado termoplásticos biodegradables en un entorno natural, como los PHBs, los cuales, si bien son aptos para el procesado por inyección plásticos y el envasado, presentan todavía condicionantes de tipo económico y de proceso, tales que justifican que deba hacerse más investigación y más estudios de viabilidad y/o factibilidad como este trabajo.

### 3. METODOLOGÍA

---

El envase actual está fabricado mediante un proceso de inyección convencional en polipropileno. Este es el punto de partida para aplicar la metodología que se detalla a continuación. La siguiente figura sintetiza las diferentes etapas.

#### 3.1 DIAGRAMA DE TRABAJO

---

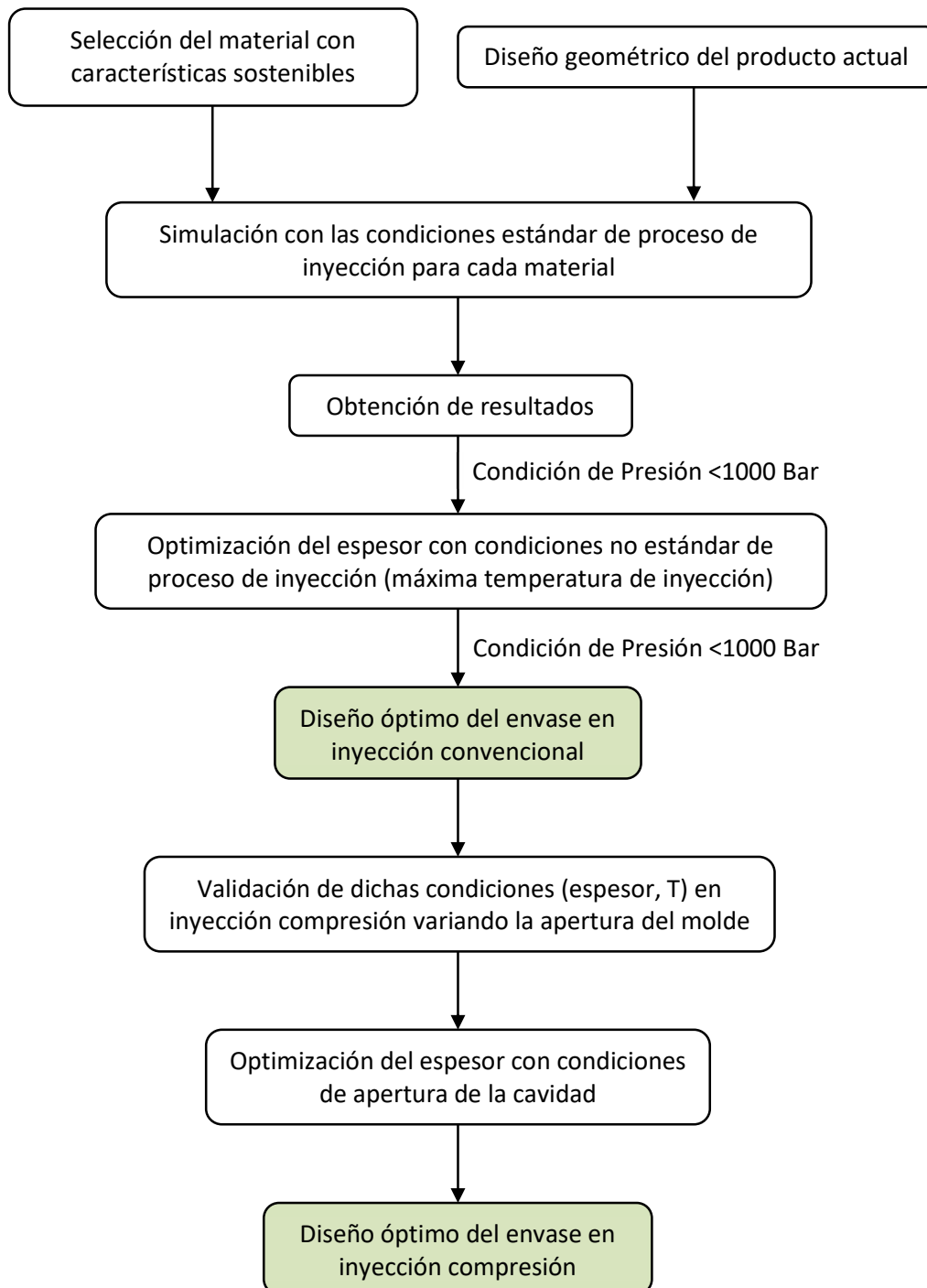


Figura 3: Esquema de la metodología del trabajo realizado.  
Fuente: Elaboración propia

Tal y como se detalla en el diagrama anterior, el proceso empieza por la selección del material, realizando unas primeras simulaciones con las condiciones estándar recomendadas para cada uno. Estas condiciones consideradas estándar son las que recomienda el programa de simulación, en base al material seleccionado y a la geometría del molde establecido. Se comprueba que estas condiciones coinciden en los valores medios de las temperaturas admisibles de inyección del plástico y de la pared del molde. Al mismo tiempo, se comprueba posteriormente que estas condiciones estándar se corresponden con la velocidad de llenado tal que la variación de temperatura en el frente de flujo tiene una variación mínima.

A la hora de realizar las simulaciones se ha tomado como objetivo limitar la presión máxima de inyección. Esta presión es la que se genera como consecuencia de hacer fluir un termoplástico fundido dentro de la cavidad del molde. Es precisamente la resistencia a fluir la que hace que aumente. Como consecuencia de este fenómeno, podemos afirmar que variables que afecten a esta resistencia generan una mayor presión. Así las cosas, cuanto más delgada es la pared de la pieza plástica o más viscoso es el material, más presión de inyección se requerirá.

Se toma como límite admisible de presión el valor de 1000 bar, ya que, pese a que valores mayores sean tecnológicamente viables, presiones altas pueden llevar a que el material sufra cierta degradación, pero sobre todo a que sea un síntoma de que el proceso se acerque a unas condiciones límite. Con presiones en la cavidad por encima de 1000 bar quedaría un margen reducido para otras caídas de presión, como pueden ser el paso por el punto de inyección o los canales de inyección o el sistema de canal caliente si lo lleva. En este caso, el proceso final de producción no sería tan robusto, pudiendo incrementarse las piezas defectuosas.

Además, la pieza quedaría sometida a esfuerzos de cizalladura elevados que dificultarían la función final de envase, por ejemplo en forma de deformaciones que no permitieran el correcto sellado de la lámina protectora, o el óptimo cierre clipado de la tapa plástica.

Tras la obtención de estos primeros resultados, se van disminuyendo los espesores para dar con el menor posible que cumple la condición de la presión límite admisible, y así conseguir la menor cantidad de material utilizado para la fabricación del producto. Para esta optimización, se aumentan las temperaturas (tanto la del molde como la de inyección) hasta las máximas admisibles para cada material para contribuir a la disminución de presión.

Estas mismas condiciones son adoptadas en inyección compresión, que permite una segunda optimización del espesor con el nuevo proceso si se tiene en cuenta la variable de apertura del molde. De esta forma, se obtienen finalmente, tras estas simulaciones, los mínimos espesores finales que admite cada material, con las condiciones máximas de temperatura y las óptimas de apertura para cada uno.

### 3.2 PRODUCTO

---

El producto sobre el que se realiza el estudio se trata de un envase de IV gama, destinado a preservar piña en rodajas en condiciones óptimas, conservando su frescor y propiedades. Es un bote fabricado en polipropileno por la empresa ITC, y comercializado al público con la fruta por la marca Hacendado.



Figura 4: Producto original de estudio.  
Fuente: ITC [3]

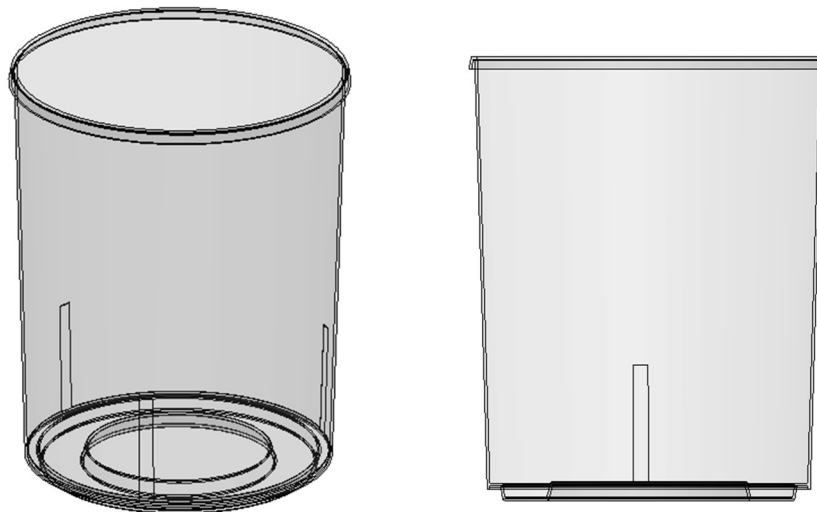


Figura 5: Vistas del modelo del envase.  
Fuente: Elaboración propia.

Es transparente, de forma que se ve el producto interior, y cuenta con una tecnología de IML (*In Mould Labeling*, o Etiquetado en Molde), donde la pegatina exterior, fabricada también en Polipropileno, forma parte del envase final en una sola pieza.

Su geometría y dimensiones son óptimas para conservar la piña, cuenta con unos espesores medios de 0,6 mm, con tan poca variabilidad que se han considerado constantes en este estudio.

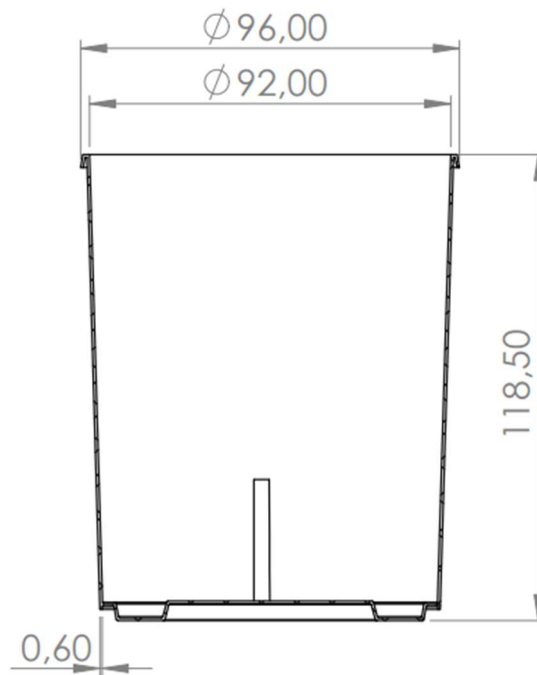


Figura 6: Sección con cotas relevantes.  
Fuente: Elaboración propia.

Como se ha mencionado, el fabricante es la empresa ITC, y pertenece a la gama Flexipack, formada por envases de IV gama fabricados en Polipropileno.

Esta compañía cuenta con una política de sostenibilidad que defiende la utilización de polímeros, reduciendo su cantidad y sustituyendo el uso de unos vírgenes por unos reciclados, así como una fabricación basada en los principios de la economía circular ya mencionada.

Para ampliar la información del producto, la empresa fabricante y su política de sostenibilidad, consultar Anexo I.

### 3.3 MATERIALES DE ESTUDIO

Si bien el envase original ya está fabricándose actualmente con un material reciclado, una de las soluciones para conseguir envases más sostenibles es la sustitución por otros más respetuosos con el medioambiente, como son los biobasados y biocompostables o biodegradables.

Para el estudio de este envase se han seleccionado diversos materiales, con diferentes propiedades y características:

- **PP PURELL 274 P:** Un Polipropileno reciclado que tiene un valor de fluidez alrededor de 20 cm<sup>3</sup>/10min. Como no se puede conocer el polipropileno base del que está fabricada la pieza, se toma este como contratipo del material original, y así obtener unos datos iniciales.
- **PP PRO-FAX ULTRA SC973:** También un Polipropileno reciclado, con la característica de tener un valor de fluidez mayor al anterior, concretamente de unos 143 cm<sup>3</sup>/10min, que facilitará la optimización del espesor en el proceso.
- **PHB MIREL P1004:** Se trata de un PHB, es decir, un bioplástico. Este es biodegradable y biocompostable, por lo que cuenta con la ventaja de descomponerse en el medio

natural sin generar microplásticos. Se convierte en una alternativa más sostenible al polipropileno, y cada vez son mayores sus aplicaciones.

- **PLA INGEO BIOPOLYMER 3052D:** En este caso, el PLA también se convierte en una opción más respetuosa con el medioambiente frente al PP, ya que proviene de materias primas renovables. Es uno de los bioplásticos más extendidos y utilizados, aunque para su degradabilidad se necesitan ciertas condiciones ambientales que no se dan en el entorno natural.
- **PLA INGEO BIOPOLYMER 3251D:** Un PLA similar al anterior pero con una fluidez mayor. Mientras en el 3052D el valor es de  $12 \text{ cm}^3/10\text{min}$ , en este asciende a un valor de alrededor de  $69 \text{ cm}^3/10\text{min}$ . Con las mismas propiedades de degradabilidad. Como en el caso de los PP, esto permitirá unos espesores menores en la pieza, ya que las presiones alcanzadas en los procesos serán menores.

Para completar la información sobre los materiales seleccionados y sus fichas técnicas, consultar Anexo II.

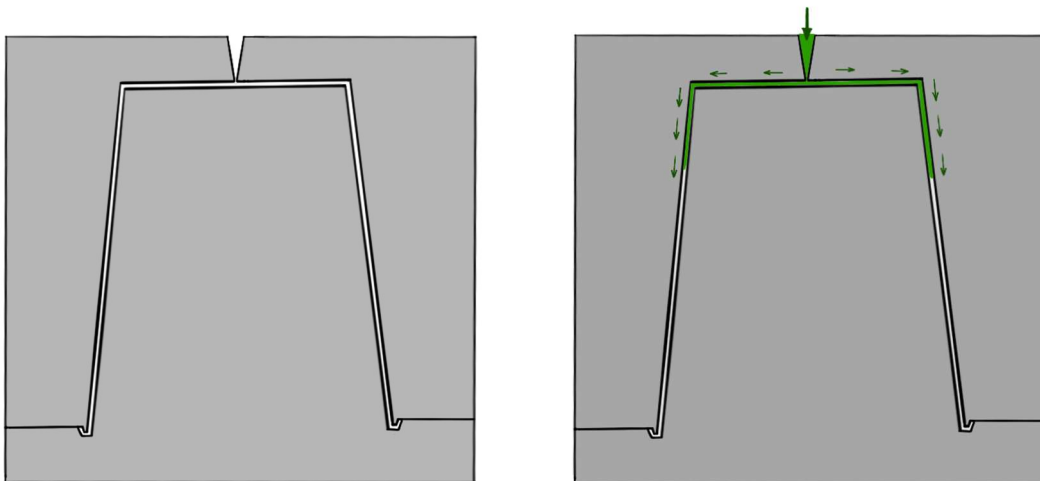
### 3.4 PROCESOS DE FABRICACIÓN

---

Como se ha mencionado, en primer lugar se han realizado simulaciones de procesos de inyección convencional, en las que el material termoplástico fundido se inyecta en un molde cerrado con la forma deseada.

Este proceso se realiza en varias fases; en primer lugar se cierra el molde, donde se inyecta el polímero fundido, de forma que la fluidez de este sea óptima. Cuando el material comienza a enfriarse, y por tanto a contraerse, se procede a la compactación, donde se inyecta un poco más de este polímero para compensar dicha contracción. Finalmente se enfría y la pieza final es expulsada. [4]

Para completar información sobre ambos procesos, consultar Anexo III.



*Figura 7: Esquema del proceso en inyección convencional.  
Fuente: Elaboración propia.*

Además de la inyección convencional, también se busca optimizar el espesor gracias a procesos de baja presión, concretamente utilizando inyección compresión para la fabricación de la pieza. [5]

En este caso, la cavidad del molde se encuentra con una apertura inicial en el momento en el que el polímero fundido se inyecta. Tras esto, el molde se cierra, completando el llenado de toda la cavidad del molde con el material por completo.

Con un adecuado control de los parámetros, este proceso consigue reducir la presión necesaria, permitiendo la fabricación de piezas con espesores más finos.

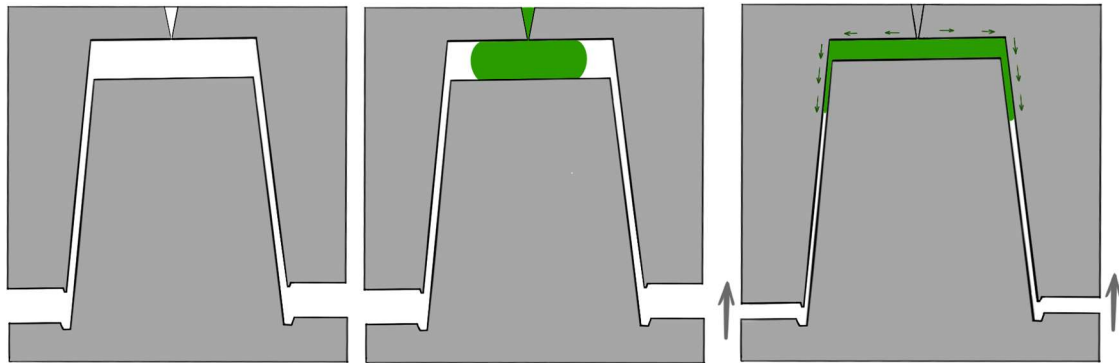


Figura 8: Esquema del proceso en inyección compresión.

Fuente: Elaboración propia.

Una variable a tener en cuenta en estos procesos es la apertura inicial de la cavidad del molde, de la que dependerá directamente la máxima presión alcanzada y por tanto los espesores que se establecerán finalmente para las piezas.

Con una mayor apertura, el proceso alcanzará una presión máxima menor. Sin embargo, una apertura excesiva puede repercutir en la calidad final de la pieza.

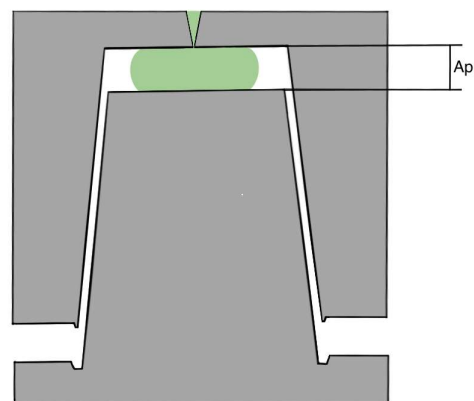


Figura 9: Parámetro de apertura.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.5 SIMULACIÓN

El programa de simulación utilizado es CADMould [6], un software que genera simulaciones precisas de procesos de inyección a partir de unos datos de entrada de tres tipos: geométricos, de material, y de condiciones de proceso.

La geometría de la pieza a fabricar se proporciona a través de un fichero de geometría 3D a partir del que el programa genera la malla de elementos finitos para los cálculos. En cuanto al material, el programa cuenta con una biblioteca de materiales en la que se encuentran datos relevantes de estos, como son las temperaturas de inyección y la del molde, el índice de fluidez y otros parámetros técnicos. Además, en la base de datos de materiales se cuenta con la información

de las propiedades que son imprescindibles para realizar la simulación. Estas son la conductividad térmica, calor específico y densidad; el diagrama PVT (que muestra la relación del volumen específico con la temperatura y la presión); las curvas de viscosidad (que muestran la relación de esta con la temperatura, la velocidad de cizalla y la presión); y el módulo elástico y el coeficiente de Poisson del material y la variación de estos con la temperatura y la orientación del polímero.

También se debe seleccionar el tipo de proceso de inyección mediante el que se va a fabricar, y establecerlos diferentes parámetros requeridos asociados a cada proceso.

En cuanto a los datos de salida, CADMould genera múltiples resultados relacionados con la viabilidad del proceso y la calidad de la pieza. De entre estos resultados, se han seleccionado varios a analizar. Por un lado, cobran importancia las imágenes y gráficas de presión, para así observar la presión máxima alcanzada en el proceso. También el tiempo de llenado al pasar, las fuerzas de cierre y la masa final de la cavidad.

Asimismo, se analizan los resultados que representan las calidades finales de la pieza; como son la contracción media, la planitud de la cara superior y la redondez de la misma, midiendo los radios del envase deformado.

## 4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

### 4.1 CONDICIONES ESTÁNDAR DE INYECCIÓN CONVENCIONAL

La tabla 1 presenta los resultados de máxima presión alcanzada en el proceso y la fuerza de cierre, resultados que se han utilizado para validar las diferentes simulaciones. En las cinco primeras columnas se presentan las condiciones estándar del proceso de inyección convencional (el material, la geometría definida por los espesores, el tiempo y las temperaturas de inyección y molde), recomendados por el programa de simulación utilizados para estas simulaciones.

Aunque no quedan representados en la tabla, también se introducen valores de otros datos de entrada como el tiempo de pospresión o el de enfriamiento en segundos y la presión de compactación. Para establecer los valores de estos, se utilizan los estándar proporcionados por el programa. En el Polipropileno Purell EP 274 P, el tiempo de pospresión es de 0,5 s, el de enfriamiento de alrededor de 1 s y la presión de compactación es de un valor de 400 bar. En el caso del PP Pro-fax Ultra SC973 el valor de presión de compactación es el mismo, mientras que el tiempo de pospresión ronda los 0,2 s y el de enfriamiento los 0,6 s. En los polímeros biobasados la presión de compactación asciende a 500 bar en todos los casos. En el PHB los tiempos de pospresión y enfriamiento son de 0,7 s y 1,5 s, respectivamente. En el PLA Ingeo 3052D de 0,6 s y 1,5 s. Y en el caso del PLA Ingeo 3251D de 0,9 s y 2 s.

Material	Esesor [mm]	Tiempo inyección [s]	T* inyección [°C]	T* molde [°C]	Máx presión [bar]	F cierre Y [kN]
PP Purell EP 274 P	nom	0,9	215	35	1355,5	745,851
	+0,1	0,941	215	35	1079,3	585,931
	+0,2	0,977	215	35	945,0	530,300
PP PRO-FAX ULTRA SC973	-0,2	0,648	202,5	35	1639,5	915,461
	-0,1	0,752	202,5	35	974,3	539,153
	nom	0,85	200	35	787,9	435,266
PHB MIREL P1004	nom	0,9	180	40	1908,7	695,028
	+0,1	0,924	180	40	1754,8	916,945
	+0,2	0,977	180	40	1692,6	925,761
	+0,3	0,966	180	40	1472,7	814,561
	+0,4	1,042	180	40	1426,8	812,127
	+0,5	1,189	180	40	1088,7	608,92
	+0,6	1,141	180	40	1182	672,329
	+0,7	1,187	180	40	1056	614,49
	+0,8	1,173	180	40	1035,2	611,241
PLA INGENO BIOPOLYMER 3052D	+0,9	1,187	180	40	995,5	601,878
	nom	1	220	40	2162,8	1149,430
	+0,1	1,083	220	40	2022,5	1113,486
	+0,2	1,135	220	40	1872,6	1071,458
	+0,3	1,167	220	40	1660,8	957,207
	+0,4	1,221	220	40	1564,1	914,164
	+0,5	1,393	220	40	1148,0	645,337
	+0,6	1,337	220	40	1280	754,000
	+0,7	1,386	220	40	1131,6	659,369
	+0,8	1,374	220	40	1157,4	695,442
PLA INGENO BIOPOLYMER 3251D	+0,9	1,391	220	40	1108,5	676,314
	+1	1,457	220	40	981,2	597,671
	nom	1	220	40	1875,5	1046,247
	+0,1	0,924	220	40	1531,9	847,485
	+0,2	0,969	220	40	1351,1	757,510
	+0,3	0,996	220	40	1220,2	692,74
	+0,4	1,042	220	40	1101,2	639,339
+0,5	1,189	220	40	678,9	371,742	
+0,6	1,115	220	40	875,1	518,153	

Tabla 1: Tabla de simulaciones de inyección convencional con las condiciones estándar.

Fuente: Elaboración propia.

En el trabajo con los espesores, se parte de los nominales de 0,6 mm ("nom"), y cada fila representa los milímetros por encima o debajo de este espesor nominal. De forma que, por ejemplo +0,1 significa que la pieza cuenta con unos espesores 0,1 mm por encima de los

nominales. Del mismo modo que -0,1 corresponde a una pieza diseñada con espesores 0,1 mm por debajo de los originales, y así sucesivamente.

Las filas en amarillo son resultado de las simulaciones con espesores nominales del producto, mientras que las resaltadas en rojo son las finales consideradas óptimas con las condiciones estándar de proceso, es decir, las correspondientes a los espesores mínimos cuya presión se encuentra por debajo de los 1000 bar.

Como primer análisis, se estudió el comportamiento y resultados del proceso de inyección en el envase con el material que se considera base (PP Purell 274 P), junto con las condiciones de temperatura estándar recomendadas para este.

Este primer análisis dio como resultado una alta presión en el proceso base, por lo que se aumentó el espesor del envase sucesivamente en intervalos de +0,1 mm hasta conseguir unos datos de presión de 945 bar, que no exceden los 1000 bar, valor considerado, como se ha mencionado previamente, como límite admisible.

Sin embargo, con el Polipropileno Pro-Fax ultra SC973, al tratarse de un polímero más fluido, los valores de presión resultan menores, por lo que se logró disminuir el espesor en 0,1 mm con respecto al nominal, obteniendo una presión de 974 bares.

En cuanto a los primeros resultados de comportamiento de los biomateriales, pueden observarse unos valores de presión altos, todos por encima del límite de 1000 bar establecido previamente.

El PHB necesita aumentar los espesores del producto en 9 décimas de milímetro, similar al caso del PLA menos fluido (PLA INGEO Biopolymer 3052D) que necesita aumentar en 1 mm el espesor para obtener presiones inferiores a 1000 bar.

Con el uso de un PLA con un valor de fluidez más alto (PLA INGEO Biopolymer 3251D), el aumento de espesor simplemente pasa a ser de 0,6, un valor más favorable para una posible reducción de material posterior.

En todos los casos las fuerzas de cierre van disminuyendo a medida que los espesores aumentan, y en ninguno de los casos estos valores dan saltos excesivamente grandes.

Se presentan, a continuación, otros resultados relevantes que aportan información acerca de la viabilidad del proceso y cómo presenta el programa estos resultados. Ya que las simulaciones generan como datos de salida unas imágenes de llenado, con múltiples resultados a analizar.

Uno de estos resultados son las imágenes de tiempo de llenado al pasar. Esta indica gráficamente la evolución del llenado de la pieza en el tiempo, mostrando si el material se frena o acelera en algún momento, o si hay alguna zona de la pieza que queda sin llenar. En la figura 10 se observa un ejemplo de estas imágenes, en las que el polímero ha llenado satisfactoriamente toda la cavidad del molde.

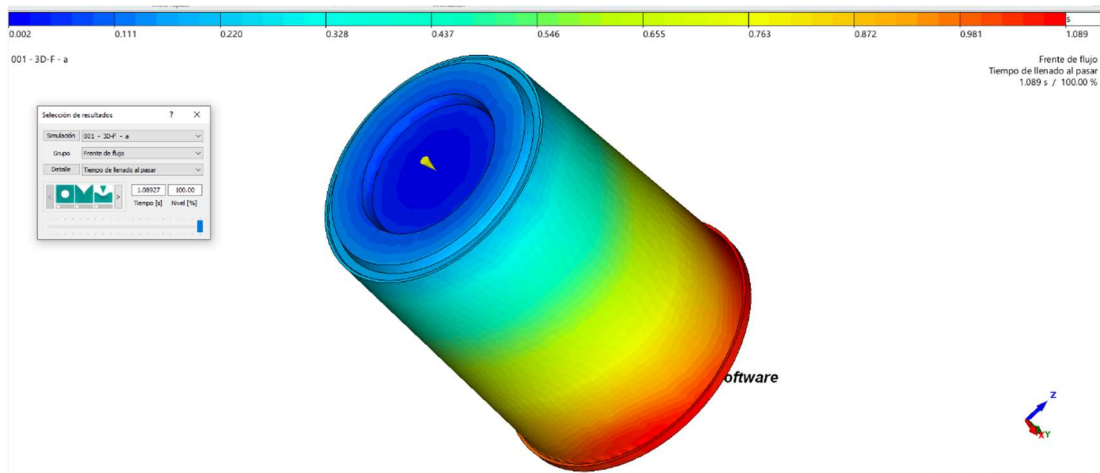


Figura 10: Imágenes de llenado en una simulación.  
Fuente: Elaboración propia con el programa CADMould.

Otro de los datos de salida, mencionado previamente, esencial para considerar un proceso válido o no, es la presión máxima que se alcanza en el proceso. Como se ha explicado, se establece un límite de 1000 bar para este criterio.

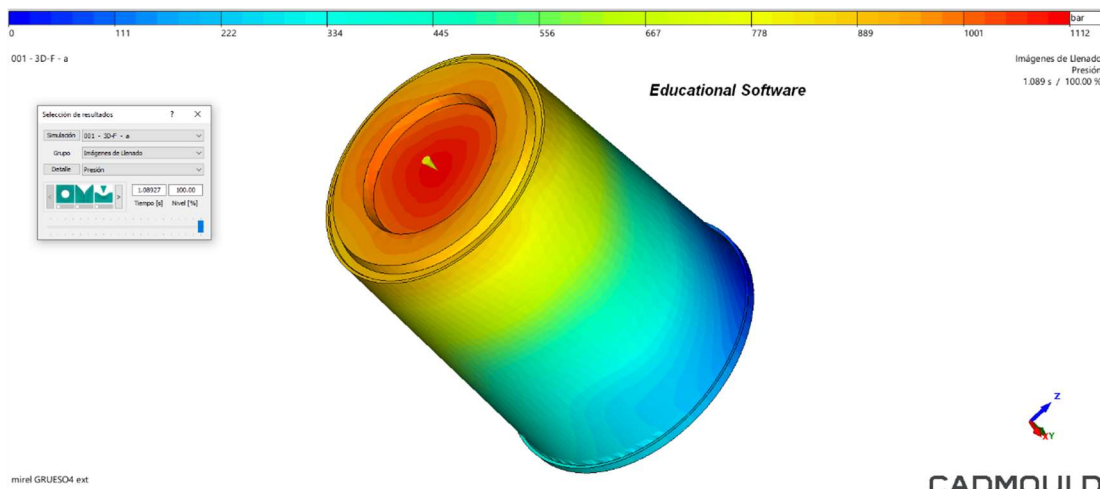


Figura 11: Imágenes de caída de presión en una simulación.  
Fuente: Elaboración propia con el programa CADMould.

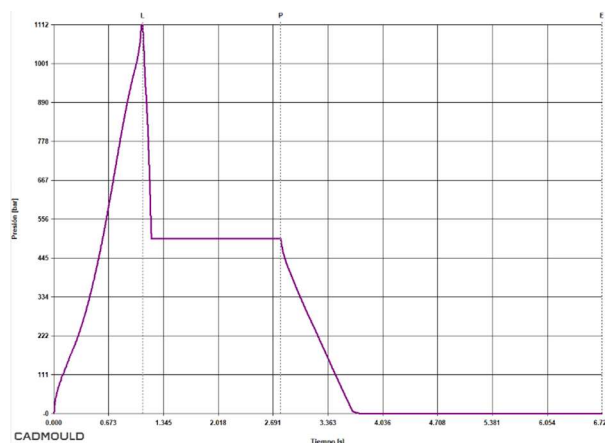


Figura 12: Gráfica de evolución de la presión.  
Fuente: Elaboración propia con CADMould.

Otro de los parámetros de salida que se ha tenido en cuenta es la masa de la cavidad, de la que podemos observar su evolución a lo largo de una gráfica generada por el programa.

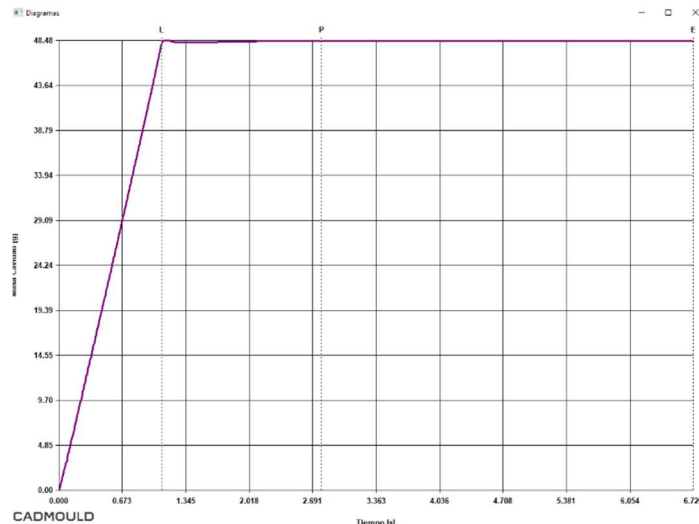


Figura 13: Gráfica de evolución de la masa de la cavidad  
Fuente: Elaboración propia con CADMould.

## 4.2 OPTIMIZACIÓN DEL ESPESOR EN INYECCIÓN CONVENCIONAL

Tras este primer estudio, se aumentan las temperaturas de proceso, tanto la de inyección como la del molde, hasta las máximas admitidas para cada polímero, un dato proporcionado por el propio programa en la biblioteca de materiales. Algunos fabricantes también ofrecen estos datos de temperaturas en las fichas técnicas de sus materiales. El resto de las condiciones del proceso se mantienen con los mismos valores que en los casos anteriores.

A continuación, en la tabla 2, se observan las temperaturas estándar y las máximas para cada material a estudiar.

Material	Condiciones de temperatura estándar		Condiciones de temperatura máximas	
	Temperatura inyección [°C]	Temperatura molde [°C]	Temperatura inyección [°C]	Temperatura molde [°C]
PP Purell EP 274 P	215	35	230	50
PP PRO-FAX ULTRA SC973	200	35	215	49
PHB MIREL P1004	180	40	190	50
PLA INGEO BIOPOLYMER 3052D	220	40	240	50
PLA INGEO BIOPOLYMER 3251D	220	40	240	50

Tabla 2: Temperaturas estándar y máximas de cada material.  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de CADMould.

Con este aumento de temperaturas, se pretende reducir la presión de inyección necesaria, lo que permitirá ir disminuyendo los espesores y encontrar el óptimo espesor para cada termoplástico, tomando, como previamente, como dato restrictivo la presión.

En cuanto a los resultados de estas simulaciones, reflejados en la tabla 3, las filas resaltadas en azul reflejan el espesor más bajo conseguido con las condiciones estándar que se han obtenido en la tabla 1. Por su lado, las rojas representan los espesores finales conseguidos con las nuevas

condiciones de proceso de temperaturas máximas admisibles, tratándose del menor espesor con el valor de presión que más se aproxima a 1000 bar sin excederlo.

Material	Espesor [mm]	Tiempo inyección [s]	Tª inyección [°C]	Tª molde [°C]	Máx presión [bar]	F cierre Y [kN]
PP Purell EP 274 P	nom	0,868	230	50	1130,5	621,986
	+0,1	0,924	230	50	901,6	498,042
	+0,2	1,014	230	50	785	442,483
	+0,2	0,977	215	35	945,0	530,300
PP PRO-FAX ULTRA SC973	-0,2	0,648	215	49	1372,7	784,610
	-0,1	0,752	215	49	780,7	429,627
	-0,1	0,752	202,5	35	974,3	539,153
PHB MIREL P1004	+0,4	1,042	190	50	1112,0	651,015
	+0,5	1,189	190	50	819,9	476,445
	+0,6	1,115	190	50	992,1	591,941
	+0,7	1,143	190	50	930	564,046
	+0,8	1,173	190	50	810,2	484,706
	+0,9	1,187	190	50	763	462,727
	+0,9	1,187	180	40	995,5	601,878
PLA INGENO BIOPOLYMER 3052D	+0,6	1,337	240	50	1035,3	620,783
	+0,7	1,348	240	50	901,9	530,803
	+0,8	1,374	240	50	936,9	578,796
	+0,9	1,391	240	50	886,8	560,026
	+1,0	1,457	240	50	775,4	477,041
	+1,0	1,457	220	40	981,2	597,671
PLA INGENO BIOPOLYMER 3251D	+0,2	0,997	240	50	1024,9	596,274
	+0,3	0,996	240	50	916,8	543,883
	+0,4	1,042	240	50	800,3	473,886
	+0,5	1,189	240	50	451,7	250,209
	+0,6	1,115	240	50	609,2	368,945
	+0,6	1,115	220	40	875,1	518,153

Tabla 3: Tabla de simulaciones de inyección convencional con condiciones extremas de temperatura.  
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, con el mismo espesor, la presión disminuye unos 200 bar en los cinco materiales. Por tanto, como se había supuesto, el aumento de las temperaturas del proceso permite la reducción de espesor con el que se puede diseñar sin sobrepasar el límite de presión establecido en casi todos los casos.

Con el Polipropileno Purell EP 274 P, solamente se ha logrado disminuir una décima, estableciéndose unos espesores finales de 0,1 mm por encima de los nominales. En el caso del polipropileno más fluido, la presión da un salto considerable al disminuir los espesores, por lo que no se consiguen reducir con respecto a los conseguidos con las temperaturas estándar. Se consideran, por tanto, unos espesores finales de 0,1 mm por debajo de los nominales.

En los polímeros biobasados, la reducción es más notable. Por un lado, el PHB se consigue reducir de 0,9 mm a 0,5 mm por encima de los espesores nominales. El PLA menos fluido pasa de 1 mm a 0,7 mm por encima, y el más fluido de 0,6 mm a 0,3 mm.

Se puede asegurar, por tanto, que en todos los casos los biopolímeros necesitarán un mayor espesor de pared en el producto con respecto a los polipropilenos para que el proceso de inyección sea óptimo. Por lo que sería momento de poner en una balanza la cantidad de material adicional necesario y las cualidades de sostenibilidad de estos.

Entre estas cualidades, destacan sus características de descomposición en el medio natural o en plantas de compostaje industrial, evitando la generación de residuos plásticos contaminantes. Además de ser fabricados a partir de materias primas naturales como el ácido láctico o generados por microorganismos. Por último, también es destacable el compromiso de los fabricantes en la reducción de la emisión de gases contaminantes a la atmósfera. Para conocer todas las cualidades de sostenibilidad de los biopolímeros, consultar Anexo II.

En todos los casos la fuerza de cierre varía progresivamente, de acuerdo a la presión, por lo que no se considera un parámetro limitante o que suponga alguna restricción en estos procesos. Sin

embargo, a la hora de tomar decisiones de índole económica, puede suceder que una mayor fuerza de cierre implique tener que usar una máquina “más grande”, la cual supone un coste mayor de inversión y amortización, un mayor coste de operación y mantenimiento y al mismo tiempo un mayor consumo energético, redundando en un proceso menos viable técnica y sosteniblemente.

#### 4.3 MODELO PREDICTIVO

Una vez analizadas las tendencias de comportamiento de los procesos en las simulaciones individuales, se desarrolla un modelo predictivo que permite observar en qué punto la presión baja de 1000 bar, definiendo el espesor óptimo para cada material.

Para ello, se carga el modelo de pieza y se seleccionan unos parámetros iniciales. Se establece un máximo y mínimo para estos parámetros. El software genera automáticamente resultados de simulaciones combinando estos valores a través de un Diseño de Experimentos.

Se parte de los espesores establecidos con las condiciones estándar recomendadas para cada material, al igual que en el caso de las simulaciones manuales.

Comenzando por el polipropileno Purell EP274, cuyo espesor de partida es 0,2 mm encima del nominal. Se pueden observar en primer lugar las 5 simulaciones que van a generarse, como combinación de los máximos y mínimos parámetros definidos anteriormente.

El programa realiza la primera simulación con las condiciones estándar, y en las demás realiza combinaciones entre los máximos y mínimos parámetros. En la siguiente imagen se puede observar cómo oscila la temperatura de inyección entre 200 °C y 230 °C y la de molde entre 20 °C y 50 °C, siendo estas últimas las que se utilizarán para optimizar el espesor del modelo. El espesor varía +/-0,1mm respecto de un espesor de partida de 0,2 mm por encima del nominal.

ID	Proyecto generado	Resultados disponibles	Temperatura del fundido [°C]	Temperatura de pared [°C]	Grupo de objetos Espesor/Diámetro 1 [mm]
<b>Automático</b>					
1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	215,000	35,000	0,000
2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	200,000	20,000	-0,100
3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	200,000	50,000	0,100
4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	230,000	50,000	-0,100
5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	230,000	20,000	0,100

Figura 14: Condiciones de las simulaciones del modelo predictivo del PP Purell EP274.

Fuente: Elaboración propia con CADMould.

A continuación, se genera un modelo de regresión numérica para cada material. El modelo permite estudiar cualesquiera combinaciones de los parámetros de simulación. Este modelo de regresión consiste en una función cuadrática con términos mixtos de la forma que se expresa a continuación:

$$\text{Presión} = A_0 + A_1 \cdot T_{\text{fund}} + A_2 \cdot T_{\text{fund}}^2 + A_3 \cdot T_{\text{pared}} + A_4 \cdot T_{\text{pared}}^2 + A_5 \cdot \text{Espesor} + A_6 \cdot \text{Espesor}^2 + A_6 \cdot T_{\text{fund}} \cdot T_{\text{pared}} + A_7 \cdot T_{\text{fund}} \cdot \text{Espesor} + A_8 \cdot T_{\text{pared}} \cdot \text{Espesor}$$

Con este modelo se pretende predecir el valor de la Presión sin necesidad de realizar más simulaciones y con un pequeño margen de error (inferior a 3%). En la figura 15 se representa el modelo de gráficas con los valores medios de temperatura y espesor, remarcando el punto de menor espesor en el que la presión es menor que 1000 bar. Cada gráfica representa la variación

de presión en función de los tres diferentes parámetros. La temperatura de fundido, de pared y el espesor, respectivamente.

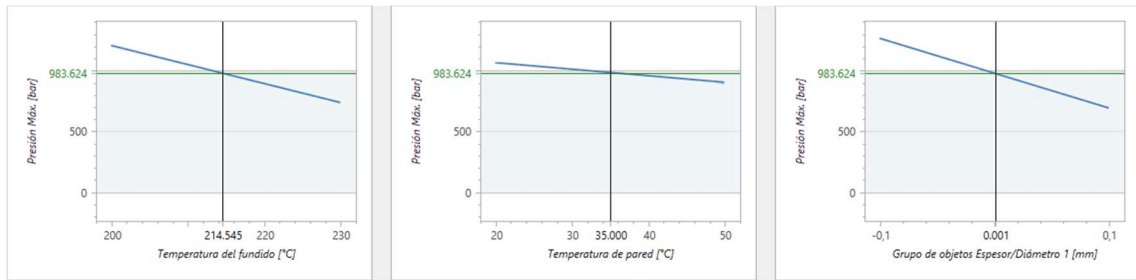


Figura 15: Modelo predictivo del PP Purell EP274 con condiciones estándar.  
Fuente: Elaboración propia con CADMould.

Una vez observado el caso con temperaturas estándar, estas se aumentan hasta las más altas definidas, que son las máximas permitidas para cada polímero. De esta forma, se conoce si se puede disminuir el espesor sin que se exceda el valor de 1000 bares de presión.

El parámetro más relevante a observar es el representado en la gráfica del espesor (la de la derecha), ya que refleja el menor espesor permitido (Eje Y) para un proceso ya optimizado gracias a aumentar las temperaturas de este. Así como la presión correspondiente a un proceso de fabricación de una pieza de este espesor (eje X).

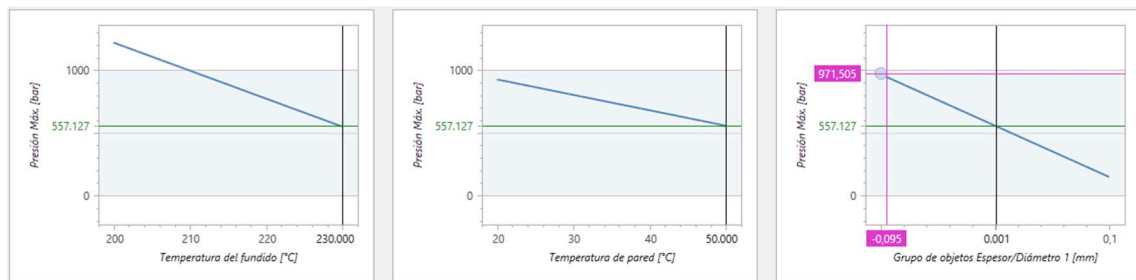


Figura 16: Modelo predictivo del PP Purell EP274 con condiciones máximas de temperatura.  
Fuente: Elaboración propia con CADMould.

En cuanto al polipropileno Pro-Fax ULTRA SC973, partiendo de espesores 0,1 mm por debajo del nominal, se realiza el estudio con unas variaciones de temperatura de inyección de 190 °C a 215 °C, y unas de pared de entre 21 °C y 49 °C, como se refleja en las combinaciones de casos a continuación.

ID	Proyecto generado	Resultados disponibles	Temperatura del fundido [°C]	Temperatura de pared [°C]	Grupo de objetos Espesor/Diámetro 1 [mm]
<b>Automático</b>					
1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	202,500	35,000	0,000
2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	190,000	21,000	-0,100
3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	190,000	49,000	0,100
4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	215,000	49,000	-0,100
5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	215,000	21,000	0,100

Figura 17: Condiciones de las simulaciones del modelo predictivo del PP Pro-Fax ULTRA SC973.  
Fuente: Elaboración propia con CADMould.

Se observan las condiciones medias reflejadas por el modelo predictivo con unas temperaturas estándar y los espesores medios con los que se ha realizado el estudio. En la gráfica de la derecha, se puede ver como el espesor es aproximadamente el estándar establecido para un valor de presión óptimo.

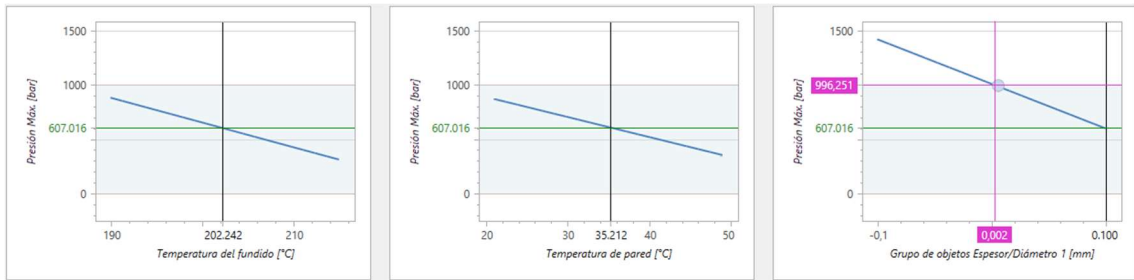


Figura 18: Modelo predictivo del PP Pro-Fax ULTRA SC973 con condiciones estándar.  
Fuente: Elaboración propia con CADMould.

Estableciendo las temperaturas máximas, se puede observar la optimización de este proceso, donde se refleja que disminuyendo en 0,088 mm el modelo cargado, el proceso sobrepasaría los 1000 bar de presión máxima.

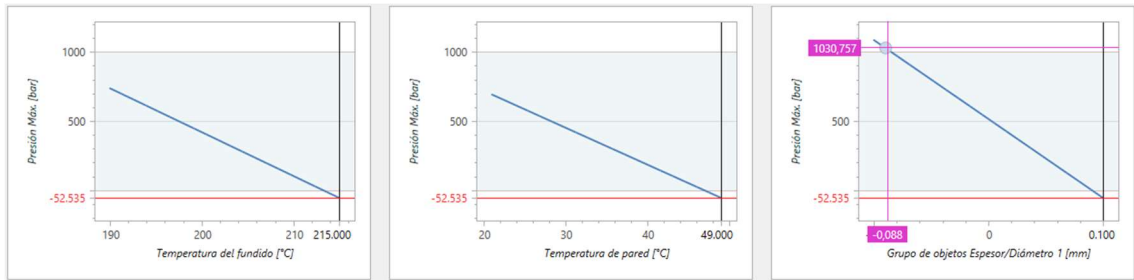


Figura 19: Modelo predictivo del PP Pro-Fax ULTRA SC973 con condiciones máximas de temperatura.  
Fuente: Elaboración propia con CADMould.

En el caso del PHB Mirel P1004, el espesor de partida es alto, en concreto de 0,9 mm por encima del nominal. En cuanto a las temperaturas de inyección y molde de partida, son de 180 °C y 40 °C respectivamente, y pueden aumentar en 10 °C ambas.

Estos datos pueden observarse en la siguiente captura, donde se muestran las combinaciones de condiciones para cada una de las cinco simulaciones que se han realizado en este modelo predictivo.

Automático						
1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	50,000	190,000	0,000	
2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	40,000	180,000	-0,250	
3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	40,000	200,000	0,250	
4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	60,000	200,000	-0,250	
5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	60,000	180,000	0,250	

Figura 20: Condiciones de las simulaciones del modelo predictivo del PHB Mirel P1004.  
Fuente: Elaboración propia con CADMould.

Con las condiciones medias de temperatura, el modelo predictivo indica el espesor mínimo sin que la presión llegue a alcanzar los 1000 bar.

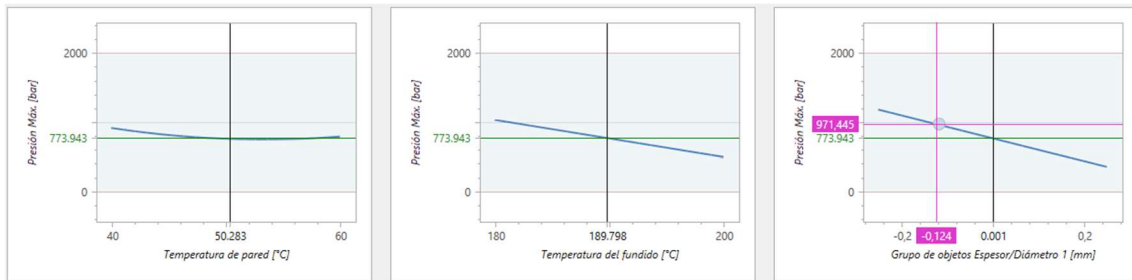


Figura 21: Modelo predictivo del PHB Mirel P1004 con condiciones estándar.  
Fuente: Elaboración propia con CADMould.

A la hora de seleccionar las máximas temperaturas de proceso, se observa que el espesor puede disminuir aún más, de forma notable.

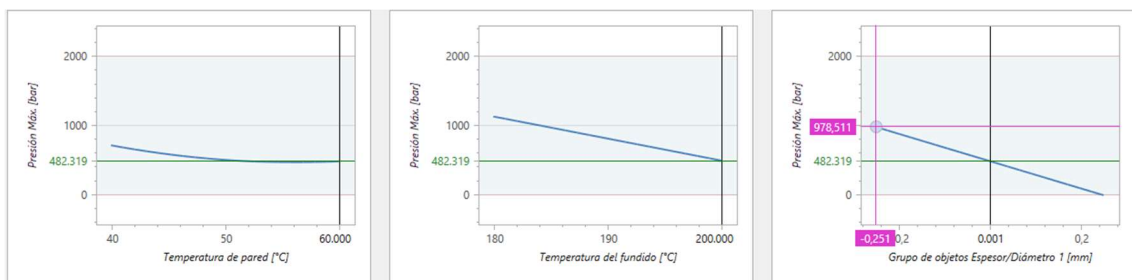


Figura 22: Modelo predictivo del PHB Mirel P1004 con condiciones máximas de temperatura.  
Fuente: Elaboración propia con CADMould.

En lo que respecta a los PLAs, el procedimiento es el mismo. Estableciendo unas temperaturas de inyección de entre 200 °C y 240 °C, y de pared de entre 30 °C y 50 °C. En el caso del menos fluido, es decir del PLA Ingeo Biopolymer 3052D, el espesor base es de 1 mm por encima de los nominales, definido en el apartado anterior.

ID	Proyecto generado	Resultados disponibles	Temperatura del fundido [°C]	Temperatura de pared [°C]	Grupo de objetos Espesor/Diámetro 1 [mm]
Automático					
1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	220,000	40,000	0,000
2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	200,000	30,000	-0,200
3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	200,000	50,000	0,200
4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	240,000	50,000	-0,200
5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	240,000	30,000	0,200

Figura 23: Condiciones de las simulaciones del modelo predictivo del PLA Ingeo Biopolymer 3052D.  
Fuente: Elaboración propia con CADMould.

Con las condiciones medias de temperaturas, los resultados obtenidos mediante el modelo predictivo son los siguientes, representados en la figura 24. Se observa que el mínimo espesor sin que la presión sobrepase los 1000 bar de presión es prácticamente el estándar seleccionado en este estudio (1 mm por encima del nominal).

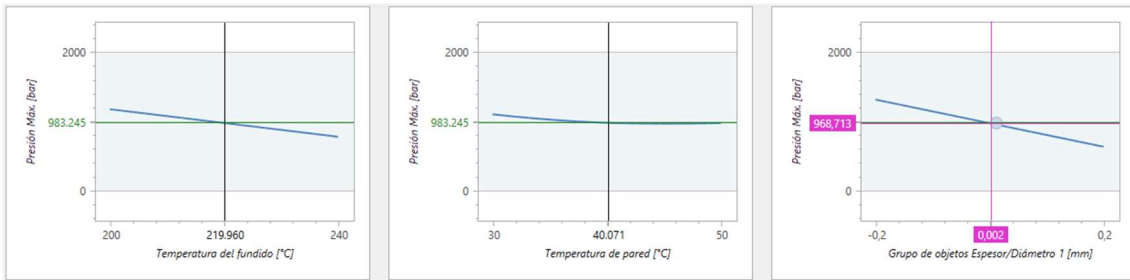


Figura 24: Modelo predictivo del PLA Ingeo Biopolymer 3052D con condiciones estándar.  
Fuente: Elaboración propia con CADMould.

En lo que respecta a los resultados cuando las temperaturas aumentan hasta las máximas permitidas, se observa una bajada significativa de la presión máxima alcanzada en el proceso, así como la posibilidad de reducir el espesor de la pieza.

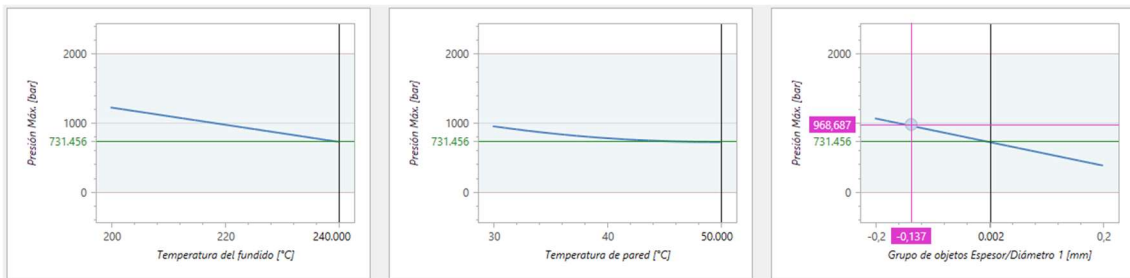


Figura 25: Modelo predictivo del PLA Ingeo Biopolymer 3052D con condiciones máximas de temperatura.  
Fuente: Elaboración propia con CADMould.

El comportamiento del PLA más fluido, el PLA Ingeo Biopolymer 3251D, es similar a este. Las condiciones estándar y máximas de temperatura son las mismas, y se parte de unos espesores 0,6 mm por encima de los nominales.

ID	Proyecto generado	Resultados disponibles	Temperatura del fundido [°C]	Temperatura de pared [°C]	Grupo de objetos Espesor/Diámetro 1 [%]
Automático					
1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	220,000	40,000	100,000
2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	200,000	30,000	82,000
3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	200,000	50,000	118,000
4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	240,000	50,000	82,000
5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	240,000	30,000	118,000

Figura 26: Condiciones de las simulaciones del modelo predictivo del PLA Ingeo Biopolymer 3251D.  
Fuente: Elaboración propia con CADMould.

Se observa que las combinaciones de parámetros máximos para realizar el modelo predictivo que genera el programa son las mismas. Con la diferencia de que en el espesor en este caso varía por porcentaje y no en más o menos milímetros.

Al igual que sucedía con su versión menos fluida, el espesor óptimo en condiciones medias de temperatura es prácticamente el inicial establecido, como reflejaban las simulaciones manuales del apartado anterior.

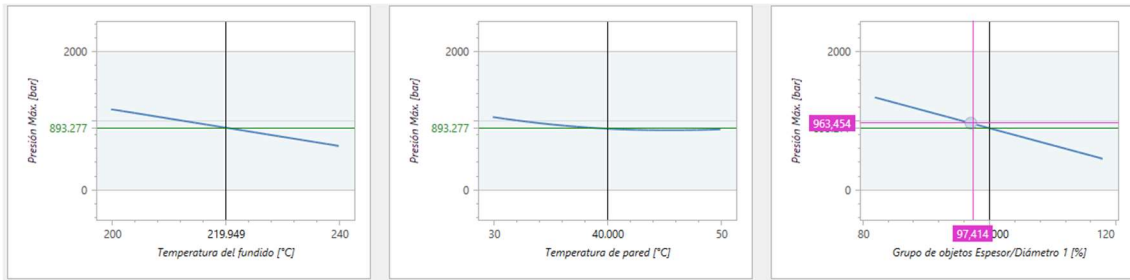


Figura 27: Modelo predictivo del PLA Ingeo Biopolymer 3251D con condiciones estándar.  
Fuente: Elaboración propia con CADMould.

Como representan las gráficas de la figura 28, cuando las temperaturas son máximas, el espesor puede continuar disminuyendo.

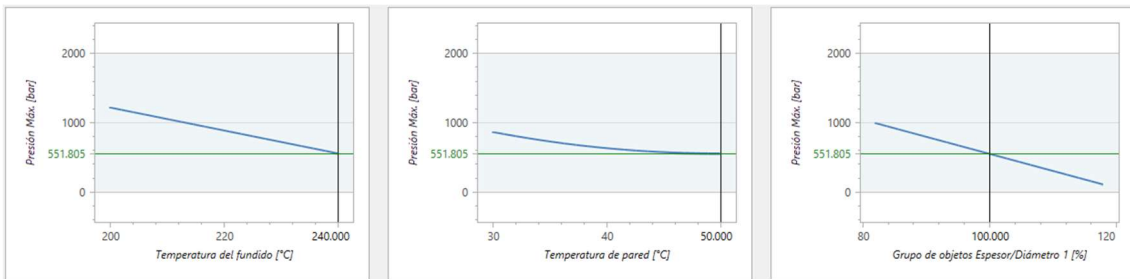


Figura 28: Modelo predictivo del PLA Ingeo Biopolymer 3251D con condiciones máximas de temperatura.  
Fuente: Elaboración propia con CADMould.

#### 4.4 INYECCIÓN COMPRESIÓN BASÁNDOSE EN ESTABLECIDOS EN INY. CONVENCIONAL

A la hora de realizar las simulaciones utilizando el proceso de inyección compresión, se parte de las temperaturas consideradas extremas en la última tabla 3, ya que, como se ha observado, estas permiten unos espesores menores que las temperaturas estándar, sin alterar la calidad del proceso ni la calidad final del producto.

Este proceso de inyección compresión añade un nuevo parámetro de entrada, que es la apertura inicial de la cavidad. En estas simulaciones dicho parámetro de apertura inicial se va aumentando y se observa el efecto sobre la presión necesaria. El resto de parámetros de entrada (tiempo de pospresión, enfriamiento y presión de compactación) son similares a los de los procesos de inyección convencional. Asimismo, el punto de partida para cada material son espesores ligeramente menores a los finales conseguidos con el proceso de inyección convencional, ya que se presupone que la presión necesaria será menor, y que incluso posteriormente van a poder reducirse aún más.

Además de los resultados de presión y fuerza de cierre, que se estudiaban anteriormente, se añaden al análisis nuevos resultados como las máximas y mínimas temperaturas del frente de flujo, que da una idea de la viabilidad del proceso si la diferencia de las mismas no es muy elevada.

Así como algunas variables que miden la calidad del producto final como son la contracción media de la pieza, la planitud y la redondez de la boca del bote, midiéndose en concreto la cara superior. Son parámetros de gran importancia puesto que la calidad de esta cara es esencial para una correcta colocación de la lámina termosellable y un óptimo cierre de la tapa.



Figura 29: Cara en la que se mide la redondez y la planitud.

Fuente: elaboración propia.

El programa permite ver una distribución de imágenes de contracción en la pieza, que representan la contracción media que experimenta el bote una vez ha finalizado el proceso, incluyendo la pospresión y el enfriamiento. Esta indica la pérdida de volumen por disminución de temperatura y presión al final del proceso. El resultado nos orienta acerca del valor numérico de esa contracción y también de la zona en la que se presentan los mayores valores de contracción, como se observa en la figura 30.

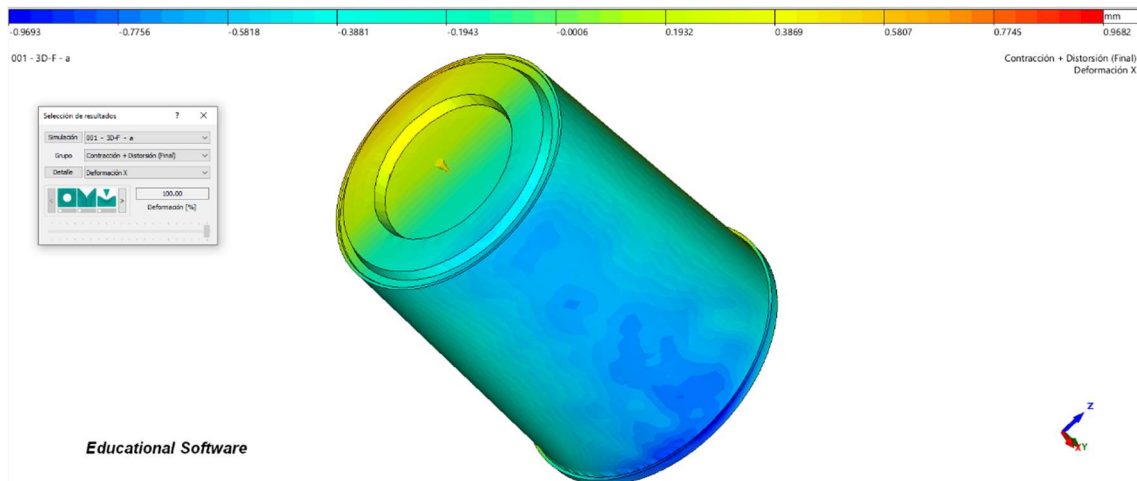


Figura 30: Pieza sometida a una contracción media del 1,33%

Fuente: Elaboración propia con CADMould.

Como se ha mencionado, otro de los datos estudiados para verificar la calidad de la pieza es la planitud de la cara superior, ya que si no es lo suficientemente plana, la pieza no debe ser considerada correcta.

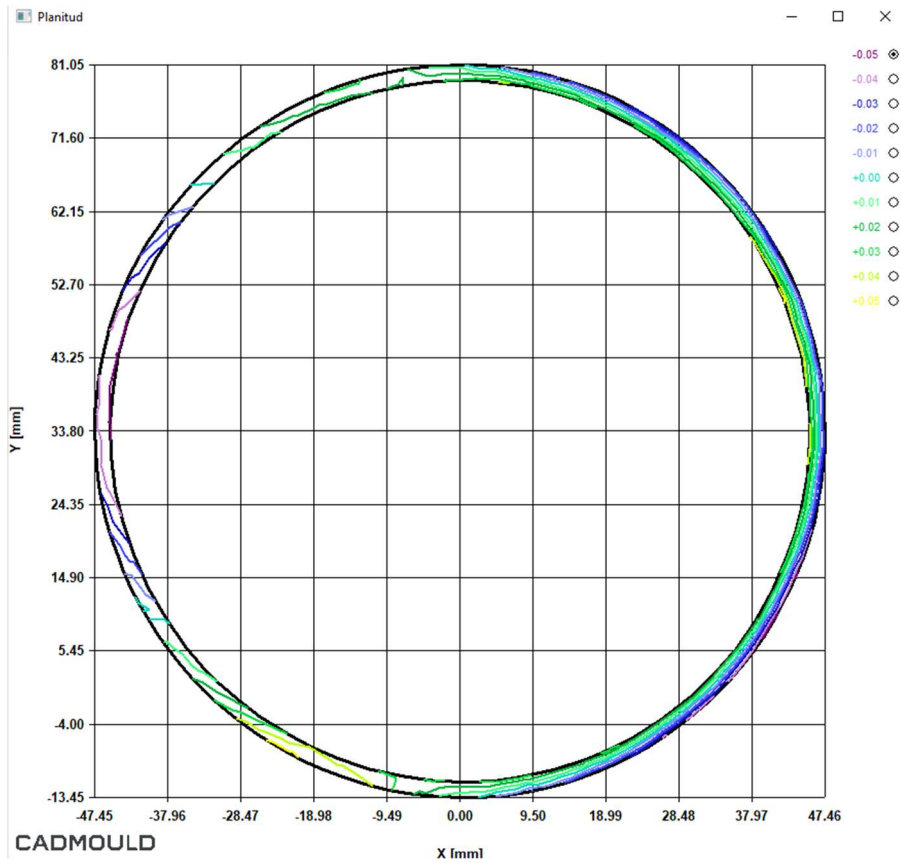


Figura 31: Planitud de una pieza con valor  $\pm 0,05$   
 Fuente: Elaboración propia con CADMould.

Además de la planitud, se analiza la redondez de la misma cara. Para ello, se observa el radio mínimo, medio y máximo y se compara con el radio teórico de la pieza.

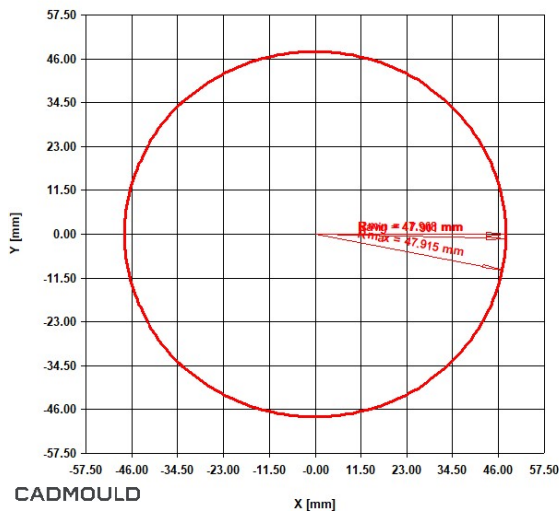


Figura 32: Redondez diseñada.  
 Fuente: Elaboración propia con CADMould.

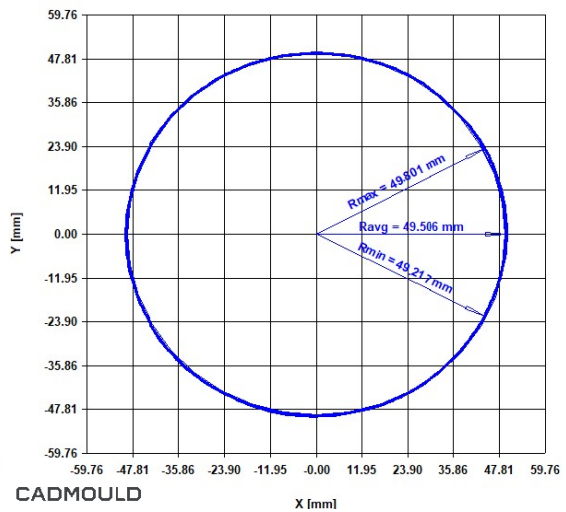


Figura 33: Redondez real deformada.  
 Fuente: Elaboración propia con CADMould.

En las siguientes tablas, se muestran estos resultados para cada uno de los materiales. Se han seleccionado las filas correspondientes a las aperturas de molde más relevantes, mostrándose las tablas completas con la totalidad de casos analizados se encuentran en el Anexo IV. La fila considerada óptima es la resaltada en amarillo.

Como muestra la tabla 3, en el caso del PP Purell EP 274P, una mayor apertura de la cavidad permite disminuir la presión necesaria en el proceso. Los parámetros que representan la calidad de la pieza final se ven afectados, pero no de forma significativa. Esto sucede hasta que se trabaja con un límite de apertura de 10 mm, a partir del cual la fuerza de cierre se dispara, así como la masa de la cavidad.

Pese a que la presión continúa bajando, a partir de este límite no se consideran simulaciones óptimas, ya que la calidad comienza a verse afectada de forma notable, como puede observarse en el crecimiento de los datos de redondez.

Inyección compresión PP PURELL EP274P (nom)								Redondez		
Apertura [mm]	Mín. Tº frente de flujo [Cº]	Máx. Tº frente de flujo [Cº]	Máx.presión [bar]	F cierre Y [kN]	Masa cavidad [g]	Contracción media [%]	Planitud	R mín [mm]	R med [mm]	R máx [mm]
0	189,2	230,3	1130,5	621,9	23,833	2,5	±0,0625	46,289	46,461	46,646
1	188,9	230	1214,4	673,6	24,111	2,47	±0,06	46,271	46,441	46,620
2	189,9	230	1216,2	673,7	24,073	2,47	±0,06	46,271	46,441	46,615
9	213,1	230	767,6	583,3	24,410	2,07	±0,06	46,370	46,510	46,633
10	213,4	230	731,0	608,778	24,743	1,76	±0,0750	46,436	46,578	46,725
11	213,1	230	698,9	2087,766	26,877	-0,67	±0,0750	47,471	47,842	48,234

Tabla 4: Tabla de simulaciones relevantes de inyección compresión en PP Purell EP274P con espesores nominales. Fuente: Elaboración propia.

Al contrario de lo sucedido en el polipropileno anterior, con el PP Pro-fax Ultra SC973 no se ha logrado bajar de manera óptima de 1000 bar en el caso de espesores de -0,2 mm para ninguno de los valores de apertura del molde, por lo que se han realizado simulaciones con los espesores conseguidos en la inyección convencional (-0,1 mm).

En este último caso se logra que la presión sea muy baja, de unos 540 bar con una apertura inicial de la cavidad de 7 mm. A partir de este valor, las simulaciones pasan a no considerarse válidas, ya que los valores de fuerza de cierre se disparan, así como la masa final de la cavidad. Asimismo, los radios que definen la redondez aumentan notablemente.

Inyección compresión PP Pro-fax ULTRA SC973 (espesor -0,2)								Redondez		
Apertura [mm]	Mín. Tº frente de flujo [Cº]	Máx. Tº frente de flujo [Cº]	Máx.presión [bar]	F cierre Y [kN]	Masa cavidad [g]	Contracción media [%]	Planitud	R mín [mm]	R med [mm]	R máx [mm]
0	146,7	215,3	1372,7	784,610	15,551	1,45	±0,4	44,839	46,370	48,130
1	146,7	215	1527,2	881,077	15,797	1,42	±0,3	47,540	47,547	47,554
2	146,3	215	1557,6	902,680	15,847	1,40	±0,3	45,661	46,569	47,664
5	184,1	215	1106,8	729,867	15,4	1,74	±0,08	46,307	46,511	46,754
6	183,6	215	980,8	1949,692	16,865	-0,56	±0,10	47,153	47,661	48,171
7	183,8	215	895,1	5778,865	19,214			Error debido a no linealidades geométricas		

Tabla 5: Tabla de simulaciones relevantes de inyección compresión en PP Pro-fax ULTRA SC973 con espesores 0,2 mm por debajo de los nominales. Fuente: Elaboración propia.

Inyección compresión PP Pro-fax ULTRA SC973 (espesor -0,1)								Redondez		
Apertura [mm]	Mín. Tº frente de flujo [Cº]	Máx. Tº frente de flujo [Cº]	Máx.presión [bar]	F cierre Y [kN]	Masa cavidad [g]	Contracción media [%]	Planitud	R mín [mm]	R med [mm]	R máx [mm]
0	171,7	215,3	780,7	429,627	21,163	1,90	±0,08	46,227	46,432	46,645
1	168,3	215	871,1	503,012	21,585	1,83	±0,05	46,607	46,702	46,839
2	169,7	215	865,5	498,686	21,569	1,83	±0,05	46,587	46,673	46,804
6	195,2	215	593,5	447,242	21,298	2,01	±0,03	46,427	46,539	46,643
7	195,4	215	539,1	650,467	21,887	1,57	±0,020	46,860	46,894	46,942
8	195,6	215	501,5	2965,982	24,617	-1,83	±0,0625	48,236	48,608	48,946

Tabla 6: Tabla de simulaciones relevantes de inyección compresión en PP Pro-fax ULTRA SC973 con espesores 0,1 mm por debajo de los nominales. Fuente: Elaboración propia.

Se observa que con el PHB también se consigue disminuir notablemente la presión necesaria en el proceso, con una apertura alta con respecto a los anteriores casos, de 14 mm, a partir de la cual el proceso pasa a no ser óptimo.

La calidad de la pieza, pese a que no se trata de un polipropileno (del que está fabricada la pieza original) continúa siendo correcta. Los valores de contracción, planitud y redondez son similares a los de los casos anteriores hasta un valor de apertura de 14 mm.

Inyección compresión PHB Mirel P1004 (espesor +0,4)								Redondez		
Apertura [mm]	Mín. Tº frente de flujo [Cº]	Máx. Tº frente de flujo [Cº]	Máx.presión [bar]	F cierre Y [kN]	Masa cavidad [g]	Contracción media [%]	Planitud	R mín [mm]	R med [mm]	R máx [mm]
0	140,8	188,6	1112,0	651,015	48,485	1,33	±0,05	47,143	47,333	47,516
1	178,9	191,4	1211,9	710,883	48,684	1,32	±0,05	47,147	47,336	47,520
2	178,7	191,4	1209,2	708,855	48,647	1,32	±0,04	47,155	47,336	47,516
13	187,4	191,3	620,0	877,767	50,76	0,65	±0,0750	47,620	47,817	48,020
14	187,3	191,3	604,7	940,799	51,324	0,42	±0,0625	47,798	47,011	48,232
15	187,3	191,3	591,6	1025,583	51,752	0,18	±0,0750	47,904	48,165	48,423
16	187,2	191,2	579,0	1099,411	52,124	-0,01	±0,10	47,895	48,265	48,597

Tabla 7: Tabla de simulaciones relevantes de inyección compresión en PHB Mirel P1004 con espesores 0,4 mm por encima de los nominales. Fuente: Elaboración propia.

En el caso del PLA Ingeo Biopolymer 3052D, el PLA menos fluido con el que se va a trabajar, puede observarse que la presión disminuye progresivamente de forma considerable. Con mayores aperturas iniciales de cavidad, esta sigue descendiendo, sin que la calidad de la pieza se vea afectada notablemente.

Inyección compresión PLA INGENO BIOPOLYMER 3052D (espesor +0,6)								Redondez		
Apertura [mm]	Mín. Tº frente de flujo [Cº]	Máx. Tº frente de flujo [Cº]	Máx.presión [bar]	F cierre Y [kN]	Masa cavidad [g]	Contracción media [%]	Planitud	R mín [mm]	R med [mm]	R máx [mm]
0	213,9	240,1	1035,3	620,783	55,816	0,57	±0,04	47,848	47,951	48,073
1	214,3	240,0	1083,6	649,08	55,860	0,57	±0,04	47,849	47,952	48,073
2	214,1	240,0	1090,4	653,349	55,755	0,57	±0,04	47,851	47,953	48,074
18	230,9	240,0	652,0	650,566	56,370	0,53	±0,05	47,868	47,923	47,983
19	231,3	240,0	613,4	674,215	56,395	0,50	±0,04	47,899	47,954	47,999
20	230,8	240,0	604,6	682,024	56,816	0,49	±0,04	47,902	47,948	48,002

Tabla 8: Tabla de simulaciones relevantes de inyección compresión en PLA Ingeo Biopolymer 3052D con espesores 0,6 mm por encima de los nominales. Fuente: Elaboración propia.

Por su lado, en los procesos de inyección compresión del PLA más fluido, la presión también se reduce, en este caso hasta la mitad de su valor inicial. En ambos PLAs se llega a una apertura relativamente grande en comparación a los polipropilenos.

Inyección compresión PLA INGENO BIOPOLYMER 3251D (espesor +0,2)								Redondez		
Apertura [mm]	Mín. Tº frente de flujo [Cº]	Máx. Tº frente de flujo [Cº]	Máx.presión [bar]	F cierre Y [kN]	Masa cavidad [g]	Contracción media [%]	Planitud	R mín [mm]	R med [mm]	R máx [mm]
0	215,9	240,2	1024,9	596,274	43,091	0,48	±0,04	47,547	47,618	47,703
1	215,8	240,0	1115,6	647,025	43,058	0,48	±0,04	47,544	47,619	47,697
2	215,9	240,0	1109,7	644,299	43,081	0,48	±0,04	47,548	47,619	47,700
12	231,1	240,0	543,9	715,340	43,544	0,43	±0,04	47,717	47,783	47,846
13	231,0	240,0	526,2	747,021	43,787	0,41	±0,04	47,747	47,811	47,868
14	208,7	240,0	1358,3	609,956	39,255			no hay conexión entre el frente de flujo y el punto de inyección		

Tabla 9: Tabla de simulaciones relevantes de inyección compresión en PLA Ingeo Biopolymer 3251D con espesores 0,2 mm por encima de los nominales. Fuente: Elaboración propia.

Tras estas simulaciones, y observando las presiones alcanzadas, se puede afirmar que la inyección compresión permitirá reducir los espesores en todos los casos, y por tanto la cantidad de material final utilizado.

#### 4.5 OPTIMIZACIÓN DEL ESPESOR EN INYECCIÓN COMPRESIÓN

Como se ha mencionado, al trabajar este proceso con molde abierto se obtienen menores presiones, y por lo tanto, este proceso posibilita una reducción de espesores aún mayor a la obtenida con la inyección convencional. Así pues, se realizan simulaciones en las que se van disminuyendo los espesores obtenidos en la inyección compresión a la vez que se varía la apertura del molde para obtener la combinación óptima de estos parámetros que hace que la presión esté por debajo de la considerada admisible (<1000 bar), para saber cuáles son los espesores óptimos finales para cada material con el proceso de inyección compresión.

Se comienzan las simulaciones tomando como referencia las aperturas obtenidas en los últimos casos, que según las tendencias observadas en los resultados anteriores tendrán que ser superiores conforme se vaya disminuyendo el espesor.

Se presentan diferentes tablas resumidas para cada uno de los diferentes espesores simulados. Para ver las tablas completas, ver Anexo IV.

##### PP Purell EP 274P:

En el caso del Polipropileno Purell EP 274P, se logra que con espesores de la pieza 0,1 mm por debajo de los originales y con una apertura de 7 mm, la presión máxima alcanzada baje de 1000 bar, sin afectar a la calidad del bote. (Tabla 10).

Inyección compresión PP PURELL EP274P (-0,1)								Redondez		
Apertura [mm]	Min. Tº frente de flujo [Cº]	Máx. Tº frente de flujo [Cº]	Máx. presión [bar]	F cierre Y [kN]	Masa cavidad [g]	Contracción media [%]	Planitud	R mín [mm]	R med [mm]	R máx [mm]
4	208,8	230,0	1341,4	661,390	21,056	2,7	±0,04	45,987	46,082	46,158
5	211,1	230,0	1235,1	834,696	21,095	2,53	±0,06	46,041	46,136	46,269
6	211,1	230,0	1081,2	718,564	21,266	2,44	±0,06	46,029	46,153	46,288
7	211,3	230,0	986,2	651,117	21,484	2,23	±0,06	46,130	46,231	46,352

Tabla 10: Tabla de simulaciones de inyección compresión en PP Purell EP 274P con espesores 0,1 mm por debajo de los nominales. Fuente: Elaboración propia.

Cuando se trata de disminuir el espesor en 0,2 mm, no se consigue bajar del límite de presión establecido, ya que las simulaciones pasan a no ser válidas porque el programa no logra acabar la simulación, y por tanto el proceso, generando un error como se observa en la tabla 11.

Inyección compresión PP PURELL EP274P (-0,2)								Redondez		
Apertura [mm]	Min. Tº frente de flujo [Cº]	Máx. Tº frente de flujo [Cº]	Máx. presión [bar]	F cierre Y [kN]	Masa cavidad [g]	Contracción media [%]	Planitud	R mín [mm]	R med [mm]	R máx [mm]
7	200,1	230,0	1522,4	1114,166	16,062	0,93	±0,25	46,142	46,624	47,183
8	Error									

Tabla 11: Tabla de simulaciones de inyección compresión en PP Purell EP 274P con espesores 0,2 mm por debajo de los nominales. Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, se puede asegurar que en las piezas fabricadas en polipropileno Purell EP 274P con un proceso de inyección compresión, los espesores finales pueden ser 0,1 mm menores que en la pieza original.

##### PP Pro-fax ULTRA SC973:

En el caso del polipropileno de mayor fluidez (PP Pro-fax ULTRA SC973), unos espesores de -0,1 mm permiten una presión de proceso muy baja, pero si estos disminuyen a -0,2 mm este pasaba

a no ser válido, ya que, como se ha mencionado anteriormente, los valores de fuerza de cierre, masa de la cavidad y radios de la cara superior aumentan de forma notable. En el anexo IV se encuentran los datos de resultados de esas simulaciones.

Por esto, como se puede observar en la tabla 12, se ha establecido un espesor intermedio, de 0,15 mm por debajo de los nominales, que se consideran los espesores finales logrados para este material. Puesto que, con una apertura de 3 mm la presión baja de 1000 bar sin repercutir en la calidad final de la pieza.

Inyección compresión PP Pro-fax ULTRA SC973 (-0,15)								Redondez		
Apertura [mm]	Mín. Tº frente de flujo [Cº]	Máx. Tº frente de flujo [Cº]	Máx.presión [bar]	F cierre Y [kN]	Masa cavidad [g]	Contracción media [%]	Planitud	R mín [mm]	R med [mm]	R máx [mm]
2	164,5	215,0	1060,5	610,266	19,553	1,69	±0,0625	46,732	46,850	47,016
3	173,1	215,0	985,4	558,518	19,517	1,74	±0,04	46,889	46,963	47,073
4	192,3	215,0	983,2	620,025	19,222	1,95	±0,03	46,595	46,704	46,801
5	192,5	215,0	784,0	551,235	19,087	1,93	±0,03	47,901	47,908	47,915
6	192,8	215,0	689,2	475,483	19,419	1,84	±0,03	46,710	46,785	46,848
7	193,0	215,0	630,1	922,127	20,133	0,91	±0,02	47,297	47,337	47,389

Tabla 12: Tabla de simulaciones de inyección compresión en PP Pro-fax ULTRA SC973 con espesores 0,15 mm por debajo de los nominales. Fuente: Elaboración propia.

#### PHB Mirel P1004:

Con el PHB, los espesores disminuyen notablemente, como se refleja en las siguientes tablas de resultados.

Con unos valores de 0,2 mm por encima de los espesores base, la presión sigue reduciéndose notablemente, como refleja la tabla 13, por lo que se continúan disminuyendo para llegar a optimizarlos.

Inyección compresión PHB Mirel P1004 (+0,2)								Redondez		
Apertura [mm]	Mín. Tº frente de flujo [Cº]	Máx. Tº frente de flujo [Cº]	Máx.presión [bar]	F cierre Y [kN]	Masa cavidad [g]	Contracción media [%]	Planitud	R mín [mm]	R med [mm]	R máx [mm]
5	188,4	192,5	1228,2	605,611	43,137	1,37	±0,025	47,158	47,260	47,345
12	187,7	191,6	719,0	1080,343	46,533	0,31	±0,04	47,831	47,937	48,020
13	187,6	191,5	698,6	1186,662	46,977	0,01	±0,04	48,027	48,138	48,236

Tabla 13: Tabla de simulaciones de inyección compresión en PHB Mirel P1004 con espesores 0,2 mm por encima de los nominales. Fuente: Elaboración propia.

Cuando los espesores son de 0,1 mm por encima de los nominales, la presión baja de 1000 bar a partir de un apertura inicial de cavidad de 8 mm (tabla 14). Por tanto, se continúan realizando simulaciones con espesores menores.

Inyección compresión PHB Mirel P1004 (+0,1)								Redondez		
Apertura [mm]	Mín. Tº frente de flujo [Cº]	Máx. Tº frente de flujo [Cº]	Máx.presión [bar]	F cierre Y [kN]	Masa cavidad [g]	Contracción media [%]	Planitud	R mín [mm]	R med [mm]	R máx [mm]
6	188,4	192,8	1179,3	814,118	40,831	1,57	±0,020	46,865	46,927	47,002
7	188,2	192,6	1049,3	838,243	41,453	1,47	±0,03	46,916	46,996	47,088
8	188,0	192,5	969,7	939,610	41,801	1,13	±0,05	47,075	47,184	47,301
9	187,8	192,3	911,6	1026,939	42,263	0,81	±0,05	47,292	47,414	47,532
10	187,8	192,2	869,3	1117,925	42,826	0,48	±0,04	47,555	47,656	47,774
11	187,6	192,2	834,0	1231,425	43,389	0,10	±0,04	47,661	47,869	48,078
12	187,6	192,0	804,6	2985,185	45,111	-1,12	±0,06	47,644	48,152	48,554

Tabla 14: Tabla de simulaciones de inyección compresión en PHB Mirel P1004 con espesores 0,1 mm por encima de los nominales. Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, como se puede ver en la tabla 15, a la hora de realizar el proceso con los espesores nominales de la pieza, este pasa a no ser óptimo, ya que, cuando la presión logra bajar de los 1000 bar, la calidad de la pieza se ve afectada notablemente, como se puede observar en la contracción media. Además, la fuerza de cierre en el eje de desmoldeo aumenta considerablemente.

Inyección compresión PHB Mirel P1004 (nom)								Redondez		
Apertura [mm]	Min. Tº frente de flujo [Cº]	Máx. Tº frente de flujo [Cº]	Máx.presión [bar]	F cierre Y [kN]	Masa cavidad [g]	Contracción media [%]	Planitud	R mín [mm]	R med [mm]	R máx [mm]
8	187,0	193,7	1080,7	1111,419	36,746	0,6	±0,0625	47,245	47,455	47,672
9	186,9	193,7	1021,0	1269,469	37,245	0,12	±0,0750	47,403	47,683	47,968
10	186,6	193,5	976,2	3773,759	39,443	-1,56	±0,06	48,225	48,700	49,098

Tabla 15: Tabla de simulaciones de inyección compresión en PHB Mirel P1004 con espesores nominales. Fuente: Elaboración propia.

Como último análisis, se observa el comportamiento del proceso cuando los espesores se reducen en 0,1 mm (tabla 16). Como cabía esperar, la presión máxima no baja de 1000 bar sin que los valores que determinan la calidad y la fuerza de cierre se vean afectadas.

Inyección compresión PHB Mirel P1004 (-0,1)								Redondez		
Apertura [mm]	Min. Tº frente de flujo [Cº]	Máx. Tº frente de flujo [Cº]	Máx.presión [bar]	F cierre Y [kN]	Masa cavidad [g]	Contracción media [%]	Planitud	R mín [mm]	R med [mm]	R máx [mm]
9	184,5	194,8	1117,7	5321,352	35,978	-2,6	±0,15	47,918	49,075	50,430

Tabla 16: Tabla de simulaciones de inyección compresión en PHB Mirel P1004 con espesores 0,1 mm por debajo de los nominales. Fuente: Elaboración propia.

#### PLA INGENIO 3052D:

En el caso del PLA INGENIO 3052D, que es el PLA menos fluido de los dos a analizar, el comportamiento es similar, ya que se logran disminuir los espesores en varias décimas de milímetro.

Como se refleja en las tablas 17, 18, 19 y 20, el proceso permite que las presiones máximas continúen disminuyendo progresivamente sin ver alterada la calidad de la pieza, incluso cuando los espesores siguen descendiendo de forma progresiva.

Inyección compresión PLA INGENIO BIOPOLYMER 3052D (+0,5)								Redondez		
Apertura [mm]	Min. Tº frente de flujo [Cº]	Máx. Tº frente de flujo [Cº]	Máx.presión [bar]	F cierre Y [kN]	Masa cavidad [g]	Contracción media [%]	Planitud	R mín [mm]	R med [mm]	R máx [mm]
3	216,8	240,0	936,8	537,318	59,559	0,69	±0,03	47,707	47,795	47,921
7	230,9	240,0	871,3	444,049	59,470	0,74	±0,04	47,755	47,842	47,970

Tabla 17: Tabla de simulaciones de inyección compresión en PLA Ingeo 3052D con espesores 0,5 mm por encima de los nominales. Fuente: Elaboración propia.

Inyección compresión PLA INGENIO BIOPOLYMER 3052D (+0,4)								Redondez		
Apertura [mm]	Min. Tº frente de flujo [Cº]	Máx. Tº frente de flujo [Cº]	Máx.presión [bar]	F cierre Y [kN]	Masa cavidad [g]	Contracción media [%]	Planitud	R mín [mm]	R med [mm]	R máx [mm]
3	205,9	240,0	1440,1	852,216	47,799	0,47	±0,05	47,619	47,733	47,842
9	227,4	240,0	1015,5	676,181	46,901	0,48	±0,05	47,665	47,778	47,907
10	227,6	240,0	960,7	640,665	47,241	0,48	±0,05	47,684	47,788	47,902

Tabla 18: Tabla de simulaciones de inyección compresión en PLA Ingeo 3052D con espesores 0,4 mm por encima de los nominales. Fuente: Elaboración propia.

Inyección compresión PLA INGENIO BIOPOLYMER 3052D (+0,3)								Redondez		
Apertura [mm]	Min. Tº frente de flujo [Cº]	Máx. Tº frente de flujo [Cº]	Máx.presión [bar]	F cierre Y [kN]	Masa cavidad [g]	Contracción media [%]	Planitud	R mín [mm]	R med [mm]	R máx [mm]
10	227,9	240,0	1014,3	667,484	45,036	0,45	±0,05	47,463	47,561	47,679
11	227,9	240,0	970,3	675,244	45,337	0,43	±0,05	47,494	47,575	47,676
12	227,7	240,0	933,0	701,780	45,523	0,41	±0,05	47,531	47,601	47,682

Tabla 19: Tabla de simulaciones de inyección compresión en PLA Ingeo 3052D con espesores 0,3 mm por encima de los nominales. Fuente: Elaboración propia.

Inyección compresión PLA INGENO BIOPOLYMER 3052D (+0,2)								Redondez		
Apertura [mm]	Mín. Tº frente de flujo [Cº]	Máx. Tº frente de flujo [Cº]	Máx.presión [bar]	F cierre Y [kN]	Masa cavidad [g]	Contracción media [%]	Planitud	R mín [mm]	R med [mm]	R máx [mm]
11	227,7	240,0	1031,8	735,865	43,489	0,38	±0,04	47,784	47,847	47,891
12	227,3	240,0	991,8	765,961	43,688	0,36	±0,03	47,845	47,883	47,924
13	228,3	240,0	958,6	794,245	43,919	0,32	±0,03	47,882	47,914	47,945
14	227,8	240,0	930,7	827,843	44,109	0,24	±0,03	47,714	47,763	47,812

Tabla 20: Tabla de simulaciones de inyección compresión en PLA Ingeo 3052D con espesores 0,2 mm por encima de los nominales. Fuente: Elaboración propia.

Al bajar de espesores 0,2 mm por encima de los de la pieza original, las simulaciones reflejan que el proceso ya no es óptimo. Ya que, al igual que sucede con los materiales anteriores, la calidad de la pieza se ve perjudicada, como puede verse en la tabla 21, en la que los valores de redondez pasan de rondar los 47 mm en todos los casos a ser mayores de 48 mm.

Inyección compresión PLA INGENO BIOPOLYMER 3052D (+0,1)								Redondez		
Apertura [mm]	Mín. Tº frente de flujo [Cº]	Máx. Tº frente de flujo [Cº]	Máx.presión [bar]	F cierre Y [kN]	Masa cavidad [g]	Contracción media [%]	Planitud	R mín [mm]	R med [mm]	R máx [mm]
12	227,1	240,0	1097,2	867,701	40,959	0,38	±0,020	47,556	47,597	47,644
13	227,5	240,0	1060,2	903,317	41,250	0,13	±0,025	47,692	47,730	47,781
14	227,1	240,0	1030,1	948,271	41,531	-0,19	±0,025	48,223	48,277	48,321

Tabla 21: Tabla de simulaciones de inyección compresión en PLA INGENO 3052D con espesores 0,1 mm por encima de los nominales. Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, se considera como óptimos para el PLA Ingeo 3052D unos espesores 0,2 mm por encima de los nominales, así como una apertura de 12 mm (tabla 20). Estos espesores representan una gran diferencia frente a los 0,7 mm por encima conseguidos en la optimización de la inyección convencional.

#### PLA INGENO 3251D:

En el caso del PLA Ingeo 3251D, al contar con un mayor índice de fluidez, los espesores óptimos pueden ser menores. Como se observa en las tablas a continuación (22 y 23), se logran disminuir hasta conseguir una pieza con valores de espesor nominales.

Inyección compresión PLA INGENO BIOPOLYMER 3251D (+0,1)								Redondez		
Apertura [mm]	Mín. Tº frente de flujo [Cº]	Máx. Tº frente de flujo [Cº]	Máx.presión [bar]	F cierre Y [kN]	Masa cavidad [g]	Contracción media [%]	Planitud	R mín [mm]	R med [mm]	R máx [mm]
8	226,7	240,0	1195,1	932,198	30,865	0,59	±0,03	47,302	47,377	47,459
9	226,5	240,0	1131,9	987,170	31,348	0,13	±0,03	47,565	47,737	47,878
10	226,9	240,0	1079,5	2379,878	33,101	-1,52	±0,06	47,933	48,356	48,678
11	227	240,0	1035,6	4019,234	36,461	-4,25	±0,0625	49,908	50,482	51,074

Tabla 22: Tabla de simulaciones de inyección compresión en PLA INGENO 3251D con espesores 0,1 mm por encima de los nominales. Fuente: Elaboración propia.

Inyección compresión PLA INGENO BIOPOLYMER 3251D (nom)								Redondez		
Apertura [mm]	Mín. Tº frente de flujo [Cº]	Máx. Tº frente de flujo [Cº]	Máx.presión [bar]	F cierre Y [kN]	Masa cavidad [g]	Contracción media [%]	Planitud	R mín [mm]	R med [mm]	R máx [mm]
6	229,6	240,0	1191,1	797,223	33,940	1,74	±0,025	46,689	46,765	46,821
7	229,5	240,0	1060,3	737,156	34,275	1,52	±0,025	46,944	47,005	47,061
8	229,4	240,0	980,4	789,309	34,535	1,22	±0,025	47,655	47,709	47,754
9	229,2	240,0	926,2	827,642	34,921	0,93	±0,020	47,302	47,377	47,459

Tabla 23: Tabla de simulaciones de inyección compresión en PLA INGENO 3251D con espesores nominales. Fuente: Elaboración propia.

Cuando los espesores bajan de los nominales, el proceso no baja de los 1000 bar de presión sin afectar en la calidad del envase, como se refleja en los datos de redondez en la tabla 24.

Inyección compresión PLA INGEO BIOPOLYMER 3251D (-0,1)							Redondez			
Apertura [mm]	Min. Tº frente de flujo [Cº]	Máx. Tº frente de flujo [Cº]	Máx.presión [bar]	F cierre Y [kN]	Masa cavidad [g]	Contracción media [%]	Planitud	R mín [mm]	R med [mm]	R máx [mm]
8	226,7	240,0	1195,1	932,198	30,865	0,59	±0,03	47,302	47,377	47,459
9	226,5	240,0	1131,9	987,170	31,348	0,13	±0,03	47,565	47,737	47,878
10	226,9	240,0	1079,5	2379,878	33,101	-1,52	±0,06	47,933	48,356	48,678
11	227	240,0	1035,6	4019,234	36,461	-4,25	±0,0625	49,908	50,482	51,074

Tabla 24: Tabla de simulaciones de inyección compresión en PLA INGEO 3251D con espesores 0,1 mm por debajo de los nominales. Fuente: Elaboración propia.

En conclusión, para todos los materiales se han logrado unos espesores óptimos menores a los conseguidos en los procesos de inyección convencional. El PP Purell EP 274P tendría unos valores de 0,1 mm por debajo de los nominales, mientras que el PP Pro-fax ULTRA SC973 permitiría unos de 0,15 mm por debajo.

En cuanto a los materiales biobasados y biocompostables, estos valores son ligeramente superiores. Para el PHB Mirel P1004, se logra situarse en 0,1 mm por encima de los nominales. En el PLA Ingeo 3052D este valor asciende a 0,2 mm, al contrario del PLA Ingeo 3251D que permite su inyección con los valores originales de la pieza.

De nuevo, como sucedía en los procesos de inyección convencional, los biomateriales requieren una mayor cantidad de material, por lo que habría que considerar las ventajas e inconvenientes de la utilización de cada uno de ellos.

Material	Iny. Convencional	Iny. Compresión
	Espesor [mm]	Espesor [mm]
PP Purell Ep274P	+0,1	-0,1
PP Pro-fax Ultra SC973	-0,1	-0,15
PHB Mirel P1004	+0,5	+0,1
PLA Ingeo biopolymer 3052D	+0,7	+0,2
PLA Ingeo biopolymer 3251D	+0,3	nom

Tabla 25: Comparativa de espesores logrados optimizando ambos procesos. Fuente: Elaboración propia

## 5. CONCLUSIONES

Como han representado las simulaciones de procesos realizadas, las piezas fabricadas con polímeros biobasados, mejores desde un punto de vista medioambiental, necesitarán un mayor espesor de pared para que puedan ser manufacturadas de manera óptima mediante un proceso de inyección.

Esto implica una mayor cantidad de material utilizado, elevando los costes y no siguiendo los principios de sostenibilidad ya mencionados, en los que la reducción de material cobra una especial importancia. Pese a este aumento de material, los polímeros biobasados tienen un menor impacto ambiental, ya que son biodegradables en el caso del PHB y biocompostables en el de los PLAs.

La ventaja de los polipropilenos utilizados para este estudio, a pesar de no ser polímeros biobasados, es que se tratan de PP reciclados, producidos a partir de plástico que ya se ha encontrado en la cadena productiva, siguiendo las políticas de la economía y la producción circular. Además, tras este estudio se ha demostrado que permiten utilizar un 80,72 % del material original usado. Esta reducción de material se consigue gracias a la fabricación mediante procesos de inyección compresión, que, al trabajar con menos presión, permiten una reducción del uso de material con respecto a la inyección convencional en todos los casos.

Material	Iny. Convencional		Iny. Compresión	
	Espesor [mm]	Peso (% de aumento con respecto al nom.)	Espesor [mm]	Peso (% de aumento con respecto al nom.)
PP Purell Ep274P	+0,1	113,66	-0,1	88,86
PP Pro-fax Ultra SC973	-0,1	87,52	-0,15	80,72
PHB Mirel P1004	+0,5	249,15	+0,1	172,89
PLA Ingeo biopolymer 3052D	+0,7	251,34	+0,2	180,69
PLA Ingeo biopolymer 3251D	+0,3	187,44	nom	142,84

*Tabla 26: Tabla comparativa de pesos en inyección convencional e inyección compresión.  
Fuente: Elaboración propia.*

Para observar la tabla completa, incluyendo datos de entrada, de calidades y características de sostenibilidad, consultar anexo IV.

Otra de las ventajas de la fabricación en inyección compresión es la disminución de las tensiones residuales que se generan en la pieza resultante, en las que tiene una gran influencia la presión alcanzada en el proceso. Incluso con piezas de espesores menores, la inyección compresión ha demostrado valores menores de tensiones residuales. Esta información puede ampliarse en el anexo III.

Teniendo todo esto en cuenta, se puede asegurar que, además de una mayor calidad final de pieza al disminuir las tensiones residuales, observando desde el prisma de la sostenibilidad, una fabricación en inyección compresión implicará un menor impacto ambiental que en inyección convencional, independientemente del material del que esté fabricado el envase.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (Miteco) [Internet]. Bruselas: Comisión Europea. [2020] Nuevo Plan de acción para la economía circular. Disponible en: [https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/nuevoplantadeaccionparalaeconomiacircular\\_tcm30-527275.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/nuevoplantadeaccionparalaeconomiacircular_tcm30-527275.pdf)
- [2] Organización de las naciones unidas [Internet] Nueva York: Naciones Unidas. [2020] Objetivos de Desarrollo Sostenible. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [3] ITC PACKAGING, S.L.U. [Internet] España: ITC Packaging. [2021] Envases para IV gama. Disponible en: <https://www.itc-packaging.com/es/envases-estandar/fruta-verdura-iv-gama/>
- [4] Dominick V. Rosato, Donald V. Rosato, Marlene G. Rosato. Injection Molding Handbook 3a ed. USA. Springer New York; 2001.
- [5] Musa R. Kamal, Avram I. Isayev, Injection Molding: Technology and Fundamentals. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG; 2012. p. 114
- [6] CADMould Manual Online Help Version 13.0, ©2020 simcon kunststofftechnische Software GmbH.
- [7] Oliveira, M., Abadias, M., Usall, J., Torres, R., Teixidó, N., & Viñas, I. (2015). Application of modified atmosphere packaging as a safety approach to fresh-cut fruits and vegetables—A review. Trends in Food Science & Technology, 46(1), 13-26.
- [8] MERCADONA, S.A. [Internet] España: Mercadona [2019]. Disponible en: <https://tienda.mercadona.es/product/3024/pina-natural-rodajas-bote>
- [9] ITC PACKAGING, S.L.U. [Internet] España: ITC Packaging. [2021] Envases para V gama. Disponible en: <https://www.itc-packaging.com/es/envases-estandar/v-gama-precocinados/>
- [10] ITC PACKAGING, S.L.U. [Internet] España: ITC Packaging. [2023] ITC Packaging desarrolla Bio2Bio, una nueva línea de envases biobasados y compostables. Disponible en: <https://www.itc-packaging.com/blog/itc-packaging-desarrolla-bio2bio-una-nueva-linea-de-envases-biobasados-y-compostables/>
- [11] LyondellBasell Industries Holdings [Internet] Texas: LyondellBasell [2022] 2022 Sustainability Report. Disponible en: <https://www.lyondellbasell.com/498cad/globalassets/sustainability/2022-lyb-sustainability-report.pdf>
- [12] LyondellBasell Industries Holdings [Internet] Texas: LyondellBasell [2023] Purell EP274P. Disponible en: <https://www.lyondellbasell.com/en/polymers/p/Purell-EP274P/06be2782-497a-43bb-b98c-526608ead9dc>
- [13] LyondellBasell Industries Holdings [Internet] Texas: LyondellBasell [2023] Pro-fax SC973. Disponible en <https://www.lyondellbasell.com/en/polymers/p/Pro-fax-SC973/ec54fd4d-e521-423a-a2f2-4e5be8cd5073>

- [14] Lee, S. Y. (1996). Bacterial polyhydroxyalkanoates. *Biotechnology and bioengineering*, vol. 49(1), p. 1-14.
- [15] MatWeb, LLC. [Internet] USA: MatWeb [s.f.] Telles Mirel™ P1004. Disponible en: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=9a8bbca39deb4e45be0710940d33448d&ckck=1>
- [16] NatureWorks LLC. [Internet] Minnesota: NatureWorks [2023] 3 Series for Injection Molding. Disponible en: <https://www.natureworkslc.com/technology-and-products/products/3-series-for-injection-molding>
- [17] NatureWorks LLC. [Internet] Minnesota: NatureWorks [2023] Eco-Profile. Disponible en: <https://www.natureworkslc.com/sustainability/eco-profile-and-life-cycle-analyses/eco-profile>
- [18] NatureWorks LLC. [Internet] Minnesota: NatureWorks [2023] Ingeo Technology. Disponible en: <https://www.natureworkslc.com/technology-and-products/ingeo-technology>
- [19] NatureWorks LLC. [Internet] Minnesota: NatureWorks [2023] Composting. Disponible en: <https://www.natureworkslc.com/sustainability/end-of-life-opportunities/composting>
- [20] NatureWorks LLC. [Internet] Minnesota: NatureWorks [2023] Recycling. Disponible en: <https://www.natureworkslc.com/sustainability/end-of-life-opportunities/recycling>
- [21] European Bioplastics e.V [Internet] Berlin: European Bioplastics [2015] Fact Sheet: Anaerobic Digestion. Disponible en: [https://docs.european-bioplastics.org/publications/bp/EUBP\\_BP\\_Anaerobic\\_digestion.pdf](https://docs.european-bioplastics.org/publications/bp/EUBP_BP_Anaerobic_digestion.pdf)
- [22] NatureWorks LLC. [Internet] Minnesota: NatureWorks [2023] Chemical recycling. Disponible en: <https://www.natureworkslc.com/sustainability/end-of-life-opportunities/chemical-recycling>
- [23] NatureWorks LLC. [Internet] Minnesota: NatureWorks [2023] Incineration. Disponible en: <https://www.natureworkslc.com/sustainability/end-of-life-opportunities/incineration>
- [24] NatureWorks LLC. [Internet] USA: NatureWorks [2002] Ingeo™ Biopolymer 3052D Technical Data Sheet. Disponible en: [https://www.natureworkslc.com/~media/files/natureworks/technical-documents/technical-data-sheets/technicaldatasheet\\_3052d\\_injection-molding\\_pdf.pdf?la=en](https://www.natureworkslc.com/~media/files/natureworks/technical-documents/technical-data-sheets/technicaldatasheet_3052d_injection-molding_pdf.pdf?la=en)
- [25] NatureWorks LLC. [Internet] USA: NatureWorks [2002] Ingeo™ Biopolymer 3251D Technical Data Sheet. Disponible en: [https://www.natureworkslc.com/~media/files/natureworks/technical-documents/technical-data-sheets/technicaldatasheet\\_3251d\\_injection-molding\\_pdf.pdf?la=en](https://www.natureworkslc.com/~media/files/natureworks/technical-documents/technical-data-sheets/technicaldatasheet_3251d_injection-molding_pdf.pdf?la=en)
- [26] VariPlast S.A. [Internet] Argentina: VariPlast [2019] Inyección de Plástico. Disponible en: <https://variplast.com.ar/inyeccion-plastico-gabinetes/>

[27] Patrick Bolliger ¿Cuándo usar la inyección de moldeo por compresión? Plastics Technology Mex. [Internet]. 2016. Disponible en: <https://www.pt-mexico.com/articulos/cuando-usar-la-inyeccion-de-moldeo-por-compresion>