



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Estudio de modificación del proceso de producción de una
pieza de PTFE para hacerla bicomponente y su
optimización para reducir tiempos de fabricación y material
desechado.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

AUTOR/A: Pastor Navarro, Manuel

Tutor/a: García Fayos, Beatriz

Cotutor/a: Arnal Arnal, José Miguel

Director/a Experimental: PASTOR CORTES, MANUEL

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría aprovechar la ocasión para agradecer, en primer lugar, a mi abuelo por haberme apoyado siempre a que continuara con mis estudios, desde el primer momento y hasta terminar el Grado en Ingeniería Química. También me gustaría agradecer a mi familia por apoyarme en mi formación profesional y a mis amigos por aguantarme en los mejores y peores momentos.

RESUMEN

El proceso de producción de la pieza de PTFE consiste en el moldeo por compresión (en frío) y posterior sinterizado para obtener barras y tubos, que luego se mecanizan hasta lograr la pieza final para el cliente.

Por necesidades de la empresa, es necesario replantear el proceso de producción, en concreto la fase de moldeo por compresión. Para ello, en primer lugar, se modificarán las condiciones de trabajo pertinentes para poder obtener una pieza de PTFE bicomponente (una parte de material virgen y otra de material cargado que mejore sus características físicas) de forma que la unión entre las dos fases sea sólida, pero las fases tengan características distintas. En segundo lugar, se diseñará el molde específico para la pieza que se va a optimizar. El molde se ajustará a la forma de la pieza final, de forma que se reducirá la cantidad de material que se desechará en la fase de mecanizado posterior. Esto implica que se desperdiciará mucho menos plástico por cada pieza fabricada y que se reducirá el tiempo de mecanizado, ya que se eliminará mucho tiempo de desbastado. Con las modificaciones desarrolladas, se reducirá el tiempo de fabricación por pieza, así como el tiempo de prensado, lo que permitirá optimizar el proceso productivo haciéndolo más eficaz.

Palabras Clave: *Politetrafluoroetileno; bicomponente; optimización; sinterizado; moldeo por compresión; mecanizado*

RESUM

El proces de producció de la peça de PTFE consisteix en l'emmotllament per compressió (en fred) i posterior sinteritzat per a obtindre barres i tubs, que es mecanitzaran fins aconseguir la peça final per al client.

Per necessitats de l'empresa, es necessari replantejar el proces de producció, en concret la fase d'emmotllament per compressió. Per fer-ho, en primer lloc, es modificaran les condicions de treball pertinents per a poder obtindre una peça de PTFE bicomponent (una part de material verge i altra de material amb un additiu que millore les seues característiques físiques) de forma que la unió entre les dos fases sigui sòlida, però les fases tinguin característiques diferents. En segon lloc, es va a disenyar el motlle específic per a la peça que es va a optimitzar. El motlle s'ajustarà a la forma de la peça final, de manera que es reduirà la quantitat de material que es rebutjarà a la fase de mecanitzat posterior. Això implica que es desaprofitarà molt menys plàstic per cada peça fabricada i que es reduirà el temps de mecanitzat, ja que s'eliminarà molt de temps de desbastat. Amb les modificacions desenvolupades, es reduirà el temps de fabricació per peça, així com el temps de premsat, cosa que permetrà optimitzar el procés productiu fent-ho més eficaç.

Paraules Clau: *Politetrafluoroetilè; bicomponent; optimització; sinteritzat; emmotllament per compressió; mecanitzat*

ABSTRACT

The production process of the PTFE piece consists first on a compression molding (cold compression) and secondly on a sintering to obtain rods and tubes, which are then machined until the final part is achieved for the customer.

For the needs of the company, it is necessary to rethink the production process, in particular the compression molding phase. To this end, first, the relevant working conditions will be modified in order to obtain a bicomponent PTFE part (one part of virgin material and the other part of charged material that improves its physical characteristics) so that the union between the two phases is solid, but the phases have different characteristics. Second, a specific mold will be designed for the piece to be optimized. The mold will fit the shape of the final part, reducing the amount of material to be discarded in the subsequent machining phase. This means that much less plastic will be wasted for each manufactured part and that machining time will be reduced, as it will eliminate a lot of desbasing time. With the modifications developed, the manufacturing time per piece, as well as the pressing time will be reduced, which will allow to optimize the production process making it more efficient.

Keywords: *Polytetrafluoroethylene; bicomponent; optimization; sintering; compression moulding; machining*

ÍNDICE GENERAL

1. MEMORIA
2. PRESUPUESTO
3. PLANOS

MEMORIA

INDICE DE CONTENIDOS

1. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN	1
1.1. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN TÉCNICA.....	1
1.2. MOTIVACIÓN ACADÉMICA.....	2
1.3. RELACIÓN CON LOS ODS.....	2
2. INTRODUCCIÓN.....	3
2.1. EL POLITETRAFLUOROETILENO (PTFE) Y SUS PROPIEDADES.....	3
2.2. EL POLITETRAFLUOROETILENO EN LA INDUSTRIA.....	4
2.3. PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE PTFE.....	5
2.3.1 EXTRUSIÓN RAM.....	5
2.3.2 MOLDEO POR COMPRESIÓN Y SINTERIZADO.....	5
2.3.2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN EN FRÍO.....	6
2.3.2.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE SINTERIZADO DEL PTFE.....	7
2.4. DESCRIPCIÓN DE LAS PIEZAS BICOMPONENTE DE PTFE Y SU FABRICACIÓN.....	9
2.5 MECANIZADO DE PIEZAS DE PTFE.....	10
2.6. OPTIMIZACIÓN DEL MOLDEO POR COMPRESIÓN.....	11
3. OBJETIVOS.....	12
4. METODOLOGÍA.....	13
4.1. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE MOLDEO.....	13
4.1.1 ESBOZO DE LA PREFORMA.....	14
4.1.2 CÁLCULO DE DIÁMETROS Y ALTURAS DE LA PREFORMA.....	14
4.1.3 CÁLCULO DE MASAS.....	16
4.1.4 DIMENSIONADO DEL MOLDE.....	18
4.1.5 DISEÑO DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN.....	18
4.1.5.1. DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL PROCESO.....	18
4.1.5.2. CÁLCULO DE LAS PRESIONES DE TRABAJO.....	18
4.1.5.3. PROCEDIMIENTO DE MOLDEO Y DESMOLDEO.....	19
4.2. OBTENCIÓN DE LA PREFORMA BICOMPONENTE.....	19
4.2.1 CÁLCULO DE MASAS POR CAPA.....	20

4.2.2 CÁLCULO DE LAS PRESIONES DE TRABAJO.....	21
4.2.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE MOLDEO.....	21
4.3. VALORACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN.....	22
5. RESULTADOS	24
5.1. RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE MOLDEO.....	24
5.1.1 ESBOZO DE LA PREFORMA	24
5.1.2 DIÁMETROS Y ALTURAS DE LA PREFORMA.....	25
5.1.3 MASAS DE LA PREFORMA Y EL MOLDE.....	27
5.1.4 DIMENSIONES DEL MOLDE.....	28
5.1.5 PROCESO DE MOLDEO	30
5.1.5 RECORRIDO DE PENSADO Y CÁLCULO DE LAS PRESIONES DE TRABAJO DEL PROCESO DE MOLDEO.....	31
5.2. RESULTADOS DE LA OBTENCIÓN DE LA PREFORMA BICOMPONENTE.....	32
5.2.1. CÁLCULO DE MASAS POR CAPA.....	32
5.2.2. CÁLCULO DE LAS PRESIONES DE TRABAJO.....	33
5.2.3. CONDICIONES DEL PROCESO DE MOLDEO Y DESMOLDEO.....	33
5.3. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	35
5.3.1 PROCESO DE OBTENCIÓN DE LA PREFORMA VIRGEN.....	35
5.3.2 PROCESO DE OBTENCIÓN DE LAS PREFORMAS BICOMPONENTE.....	36
5.3.3. OBSERVACIONES GENERALES DEL PROCESO DE MOLDEO Y MECANIZADO PARA LOS TRES TIPOS DE PREFORMA PRODUCIDOS.....	38
5.3.4. COMPARACIÓN DE LOS PROCESOS DE MOLDEO Y MECANIZADO ORIGINAL Y DE ESTE PROYECTO.....	39
6. CONCLUSIONES	41
6.1. PREFORMA VIRGEN.....	41
6.2. PREFORMAS BICOMPONENTE.....	41
6.3. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO.....	41
7. BIBLIOGRAFÍA.....	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fórmula del monómero de PTFE.	3
Figura 2. Esquema del proceso de transformación del PTFE por extrusión ram.	5
Figura 3. Esquema del proceso de prensado con una prensa unidireccional.	7
Figura 4. Gráfica de temperaturas del proceso de sinterizado y sus etapas.	8
Figura 5. Representación del proceso de fabricación de piezas bicomponente.	9
Figura 6. Esquema del proceso de mecanizado de piezas de PTFE.	10
Figura 7. Esquema en sección de las diferencias de material sobrante, entre un cilindro macizo y una preforma, para la pieza del estudio.	11
Figura 8. Representación de la adición del aditivo en la preforma para la fabricación de las piezas bicomponente.	13
Figura 9. Representación del proceso de diseño.	14
Figura 10. Diagrama de bloques de la optimización del proceso de moldeo.	15
Figura 11. Esquema en sección de las contracciones y dilataciones tras el sinterizado de la preforma.	15
Figura 12. Representación de los pasos para calcular los diámetros de la preforma.	16
Figura 13. Parámetros para calcular las alturas de la preforma sinterizada.	17
Figura 14. División de las secciones de la preforma.	18
Figura 15. Diferencia de volúmenes entre la preforma en crudo y el molde.	18
Figura 16. Representación de las alturas y volúmenes en la adición del bicomponente.	21
Figura 17. Representación de la adición de las capas para el prensado de la primera opción de la preforma bicomponente, solo dos capas.	22
Figura 18. Representación de la adición de las capas para el prensado de la segunda opción de la preforma bicomponente, tres capas.	22
Figura 19. Esquema en sección de la preforma con los factores para ajustarse a la pieza. ...	25
Figura 20. Representación de las alturas para la preforma sinterizada según la metodología, en mm.	26
Figura 21. Dimensiones de ambas preformas según la metodología, en mm.	26
Figura 22. Volúmenes y masas de las distintas zonas de la preforma en crudo.	27
Figura 23. Redistribución de masas en el molde.	28
Figura 24. Volúmenes y dimensiones del molde, en mm.	29
Figura 25. Esquema en sección del montaje completo para el moldeo por compresión.	30

Figura 26. Recorrido y dimensiones antes y después del prensado, en mm.	31
Figura 27. Representación del proceso de moldeo optimizado con todos los elementos. ...	33
Figura 28. Representación del proceso de extracción de la preforma.	34
Figura 29. Imagen de la pieza terminada y la preforma sinterizada.	35
Figura 30. Imagen de las preformas bicomponente sinterizadas.	36
Figura 31. Imagen de la rebaba generada tras el prensado.	38
Figura 32. Imagen del cambio en la pieza bicomponente.	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de los diámetros y diferencias entre las distintas etapas de fabricación. ...	27
Tabla 2. Valores de volúmenes y masas de la preforma en crudo y del moldeo, según las distintas densidades.	30
Tabla 3. Valores de alturas para las zonas 1 y 3 del molde calculadas según metodología. .	31
Tabla 4. Presiones de trabajo para las superficies de la preforma virgen.	34
Tabla 5. Alturas, volúmenes y masas para las preformas bicomponente.	34
Tabla 6. Presiones de trabajo para las preformas bicomponente.	35
Tabla 7. Medidas reales de las tres preformas sinterizadas.	37
Tabla 8. Medidas reales de las preformas bicomponente sinterizadas de dos capas.	39
Tabla 9. Medidas reales de las preformas bicomponente sinterizadas de tres capas.	39

1. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN

1.1. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN TÉCNICA.

El presente Trabajo Fin de Grado (TFG) surge a partir de la actividad laboral del autor en la empresa MP Neocomposites S.L donde se transforma politetrafluoroetileno mediante el método de moldeo por compresión en frío y sinterizado y se mecanizan piezas de plásticos técnicos para otras industrias. Durante el trabajo, se observa la necesidad de mejorar las características y funcionalidad de las piezas de politetrafluoroetileno (PTFE) obtenidas, así como optimizar el proceso productivo para hacerlo más eficiente y rentable, dando lugar al presente TFG.

La producción de piezas bicomponentes de PTFE no es muy común en la industria del plástico, y responde a la necesidad de generar piezas que tengan distinto comportamiento con el fin de evitar el rozamiento, calentamiento o esfuerzos mecánicos para su funcionamiento.

Las propiedades del PTFE se pueden mejorar añadiendo en la formulación un determinado porcentaje de aditivos para obtener granzas de PTFE cargadas, de forma que el aditivo está distribuido uniformemente en el PTFE. Cualquier proceso de producción convencional, como la extrusión, permite producir todo tipo de elementos de PTFE cargado, pero para producir piezas bicomponentes son necesarios procesos de moldeo por compresión.

El moldeo por compresión, permite una unión sólida entre las dos zonas de la pieza, la zona virgen y la zona cargada se unen molecularmente sin necesidad de utilizar otros métodos, como resinas o tornillos. Las piezas producidas son consistentes ya que ambas partes tienen como base el PTFE, lo que permite que conserven las características mecánicas sin ser frágiles en la unión.

Por otra parte, se aborda un segundo problema, y es la reducción de material desperdiciado y de tiempos de desbaste en piezas obtenidas a partir de barras o tubos macizos, en los que se precisan agujeros pasantes o determinadas formas. En la industria en general se trabaja con moldes cilíndricos sin estar optimizados lo que supone ajustar la preforma a la forma final, desperdiciando material y aumentando el tiempo de producción de la pieza al añadir una etapa de desbaste.

Para ello se propone obtener por moldeo preformas cilíndricas y cónicas con distintos diámetros, o con agujeros pasantes mediante moldes que estén optimizados. Esto supone una ventaja a la hora de mecanizar y dar la forma final a las piezas a partir de estas preformas, ya que si se ajusta la preforma a la forma final de la pieza se reduce la cantidad de material desperdiciado y los tiempos de desbaste, disminuyendo el coste de producción al consumir menos material de PTFE.

En la industria polimérica en general se trabaja con moldes cilíndricos sin estar optimizados y se fabrican piezas de un solo componente plástico. Por tanto, estudiar la fabricación de piezas de PTFE bicomponentes y optimizar su mecanizado posterior partiendo de preformas supone dar solución a dos problemas presentes actualmente en la fabricación de piezas poliméricas y constituye la principal motivación de este estudio.

1.2. MOTIVACIÓN ACADÉMICA.

Se ha realizado el presente estudio para poder aplicar los conocimientos adquiridos durante el Grado en Ingeniería Química, de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial en la Universitat Politècnica de València, y poder finalizar los estudios y obtener el título pertinente.

1.3. RELACIÓN CON LOS ODS.

Con respecto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU el presente documento contribuye a los objetivos 9 y 12. En primer lugar, este estudio trata sobre la mejora industrial por lo que se cumple el noveno objetivo de industria innovación e infraestructura. En segundo lugar, se cumple el duodécimo objetivo de producción y consumo responsable, ya que la optimización del proceso presente en este estudio reduce la cantidad de material desperdiciado durante el proceso, disminuyendo la cantidad de residuos considerablemente.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. EL POLITETRAFLUOROETILENO (PTFE) Y SUS PROPIEDADES.

El PTFE es un polímero termoplástico cuyo monómero es el tetrafluoroeteno (**Figura 1**) que está formado por un 76% de flúor aproximadamente. Es conocido comercialmente como Teflón® y fue descubierto en 1938 por el Dr. Roy J. Plunkett en los laboratorios de DuPont (Dhanumalayan & Joshi, 2018).

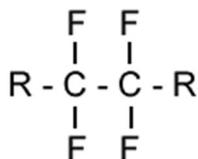


Figura 1. Fórmula del Monómero de PTFE.

El PTFE tiene un alto peso molecular, en comparación con otros termoplásticos, y una naturaleza semicristalina. Debido a sus características está presente en muchos ámbitos, tanto en la industria como en nuestros hogares (Dhanumalayan y Joshi, 2018).

El politetrafluoroetileno tiene muchas propiedades que no tienen otros polímeros y por ello es un elemento muy producido en la industria. Su bajo coeficiente de rozamiento y su alta resistencia mecánica lo hace muy útil para fabricar elementos móviles. Es muy utilizado en la industria química y alimentaria ya que es un material inerte, no reacciona con ningún compuesto químico debido a la fuerte unión molecular de los enlaces carbono-flúor. A pesar de ser un termoplástico tiene una alta resistencia térmica con una temperatura máxima de trabajo de hasta 260° C. Además, presenta las propiedades características de los termoplásticos como su ductilidad, que le permite ser fabricado en infinidad de formas con facilidad, es hidrofóbico y aislante térmico (Dhanumalayan y Joshi, 2018).

El PTFE se obtiene por la polimerización del radical libre de su monómero. Se pueden obtener diferentes tamaños de partículas, siendo las cadenas más largas o más cortas en función del grado de polimerización, como en cualquier otro termoplástico. Se puede obtener en polvo fino, en grano de diferentes tamaños, en forma de resina, como una pasta o en forma de emulsión. Gracias a esta diversidad de obtención se pueden fabricar elementos muy diversos como tubos o láminas, membranas porosas o recubrimientos de protección. Además, se pueden añadir muchos aditivos distintos, como el carbón-grafito para lubricar y mejorar el movimiento, la fibra de vidrio para evitar el desgaste por rozamiento o el bronce para aumentar su vida útil (Dhanumalayan y Joshi, 2018).

El Politetrafluoroetileno es el elemento principal en este estudio ya que la pieza que va a ser modificada y a optimizar se fabrica con este material, al igual que muchos otros componentes de la industria. Además, todas las premisas del estudio se toman en base al PTFE y algunas de sus propiedades, por lo que no sería válido para cualquier otro termoplástico.

2.2. EL POLITETRAFLUOROETILENO EN LA INDUSTRIA.

La industria del politetrafluoroetileno se divide en dos actividades:

-Por un lado, se encuentran las empresas productoras de PTFE que se encargan de su polimerización en todas sus formas. Son las empresas proveedoras de la materia prima, la cual será transformada posteriormente para producir las piezas y elementos finales. Esta industria facturó un total de 1100 millones de dólares solo en 2019, siendo el principal productor China y el mayor comprador Estados Unidos (Data information of PTFE, 2021).

-Por otro lado, se encuentran la industria de transformación del PTFE, la cual produce los elementos finales a partir de la materia prima. El moldeo por compresión y la extrusión son los principales métodos que se utilizan para transformar el PTFE. Además, también se puede transformar el PTFE por los métodos de inyección y moldeo por soplado, pero son menos comunes debido a la alta viscosidad del PTFE fundido. Tanto en España como en Europa ésta es la industria predominante, transformar y producir todo tipo de elementos para sectores muy diversos (Dhanumalayan y Joshi, 2018).

En la industria automovilística se emplean muchos elementos fabricados con PTFE para incrementar la lubricación de los elementos móviles, previniendo el sobrecalentamiento causado por la fricción. Es un material con tan bajo coeficiente de rozamiento que se utiliza como material autolubricante. También es un elemento muy utilizado en la industria petroquímica, gracias a sus propiedades tribológicas, y por su estabilidad térmica, se puede utilizar en la maquinaria que trabaja a altas temperaturas en el refinado de gases y petróleo. El PTFE también se ha convertido en un elemento imprescindible en la industria alimentaria, desde recubrimientos antiadherentes, cintas transportadoras o juntas de estanqueidad debido a que es un material inerte y perfecto para ser posteriormente higienizado. Además, al no reaccionar con los elementos químicos a los que se expone es perfecto para la industria química. Su estabilidad térmica, permite el empleo en válvulas, recubrimientos, juntas de estanqueidad o recipientes contenedores para producir todo tipo de productos altamente reactivos como gases o ácidos. Por ser un material inerte que no reacciona con la materia orgánica, se utiliza el PTFE en el campo de la biomedicina, la ingeniería tisular y la industria farmacéutica. También se

emplea el PTFE como aislante eléctrico en grandes instalaciones eléctricas y como elementos de estanqueidad en la fabricación de barcos y submarinos (Dhanumalayan y Joshi, 2018).

2.3. PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE PTFE.

El PTFE al no tener las mismas propiedades que los termoplásticos convencionales tiene limitados los métodos de transformación en la industria. Dichos procesos son la extrusión Ram y el moldeo por compresión y sinterizado.

2.3.1 EXTRUSIÓN RAM.

El PTFE no tiene un punto de fusión definido como los demás termoplásticos, si no que a partir de cierta temperatura se convierte en un estado gelatinoso que genera mucha resistencia en los procesos de extrusión convencionales. Por ello, el PTFE tiene su propio método de extrusión, denominado extrusión ram (The extrusión of PTFE granular powders, 2001).

El proceso de extrusión ram consiste en volcar cantidades controladas de PTFE granulado mediante vibración en la extrusora. El material se va empujando y comprimiendo con un pistón a lo largo de un tubo vertical, de forma continua. Por todo el tubo se aplica temperatura de forma que el PTFE se va calentando y gelificando, de esta forma las moléculas se van uniendo. Al final del proceso se enfría el extruido a temperatura ambiente y se devuelve a su estado sólido. En la **Figura 2** se representa esquemáticamente el proceso de extrusión ram. (The extrusion of PTFE granular powders, 2001)

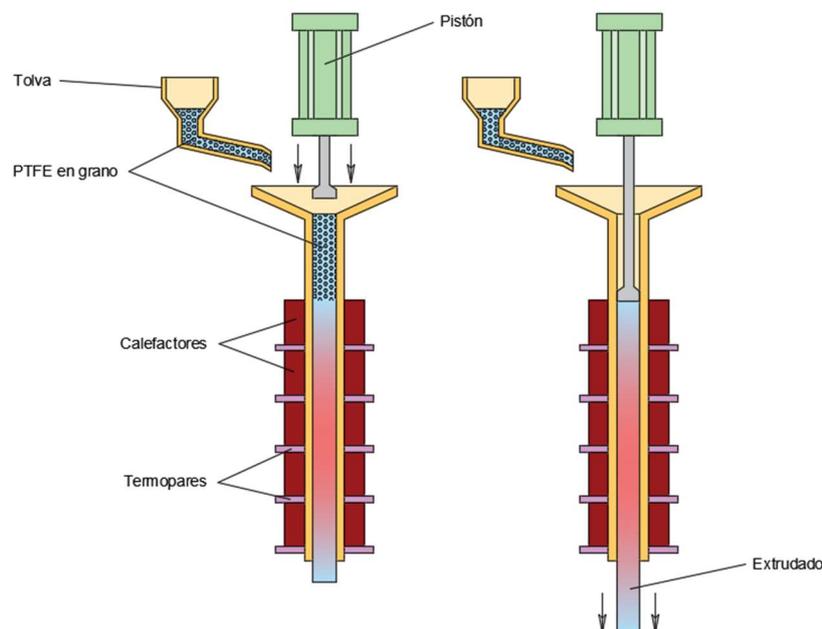


Figura 2. Esquema del proceso de transformación del PTFE por extrusión ram.

2.3.2 MOLDEO POR COMPRESIÓN Y SINTERIZADO.

El PTFE es un material muy dúctil y presenta una alta viscosidad tras sobrepasar el punto de fusión, por lo que puede transformarse en dos fases. En primer lugar, gracias a su ductilidad se

puede prensar en frío, es decir, se puede colocar el material en polvo en un molde y prensarlo para darle forma sin aplicar temperatura. En segundo lugar, se coloca el polvo prensado en una estufa, sin el molde, para aplicar un tratamiento térmico que funde el polvo y lo transforme en una pieza sólida de PTFE. Esta es la etapa de sinterizado y puede realizarse gracias a la alta viscosidad del PTFE en el punto de fusión (Blair, 1971).

Este proceso se suele realizar en caliente para la mayoría de polímeros, es decir, se moldea y se aplica el tratamiento térmico a la vez, debido a que la mayoría de los termoplásticos se deforman al fundirse. Sin embargo, el PTFE puede transformarse por separado debido a que en el punto de fusión el material se convierte en un gel muy viscoso que no se deforma si no se le aplica un esfuerzo mecánico, es decir, no se deformará si no se toca.

Poder moldear primero y luego aplicar el tratamiento térmico es mucho más sencillo que moldear en caliente, por lo que en la industria todos los procesos de moldeo por compresión del PTFE se hacen en frío. Además, el tratamiento térmico permite que el material se enfríe lentamente obteniendo una estructura molecular lo más cristalina posible sin tensiones internas, lo que permite una alta estabilidad dimensional durante el mecanizado. Es por ello que este proceso es el más utilizado en la industria para transformar el PTFE.

Éste es el proceso que se va a optimizar en el estudio y el único que puede utilizarse para fabricar piezas bicomponente.

2.3.2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN EN FRÍO.

Con el fin de asegurar una buena compactación se parte del PTFE en polvo. El material debe tratarse en una cámara bien ventilada, limpia y con poca humedad, para evitar la contaminación del material, ya que podrían generar manchas negras en la pieza tras someter las impurezas a altas temperaturas (Dupont, 1988).

La aplicación de presión se realiza mediante una prensa hidráulica unidireccional, es decir, solo tienen un vástago que prensa desde arriba hacia abajo. Esto genera un gradiente de presión en el interior del molde, donde la presión se acumula en la parte superior por el rozamiento del material con las paredes. Para solucionar este problema, e igualar las presiones, solo hay que añadir un pequeño pistón en la parte inferior junto con unos levantes. En la **Figura 3** se describe gráficamente el proceso. En primer lugar, se coloca el molde con el pistón inferior, los levantes y el polvo en su interior (1). En segundo lugar, se prensa hasta superar aproximadamente la mitad de la presión total necesaria, de esta forma la presión se acumula en la parte superior (2). Para deshacer el gradiente se deja de aplicar presión, ahora el material estará compactado y ejerciendo fuerza sobre las paredes del molde, por lo que se pueden eliminar los levantes sin que el molde se caiga sobre el pistón inferior (3). Por último, se vuelve a aplicar la presión lentamente hasta llegar al total requerido. Aunque la fuerza se ejerce desde arriba ahora hay dos pistones que se mueven hacia dentro del molde, igualando lentamente las presiones en el interior (4) (Howard y col., 1974).

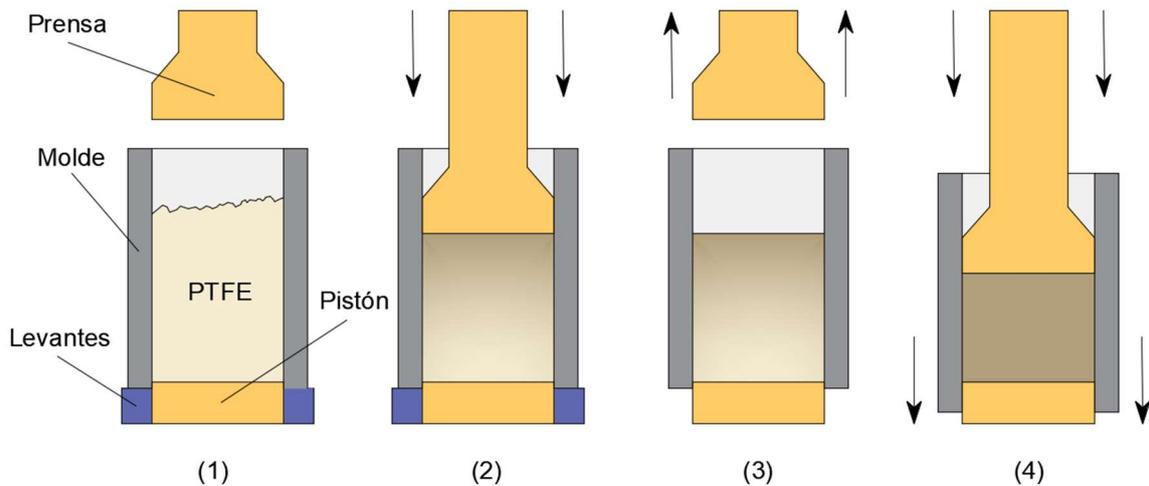


Figura 3. Esquema del proceso de prensado con una prensa unidireccional.

Durante el proceso de prensado se va liberando el aire que se encuentra dentro del material en polvo. Debido a la salida del aire la presión decae lentamente y se tiene que volver a ajustar para que permanezca constante, por lo que el proceso requiere un tiempo de control. A medida que se prensa el volumen muerto se reduce y el aire acumulado se libera. Cuando la presión se mantiene constante sin decaer se finaliza el proceso de moldeo.

Este proceso de transformación del PTFE es perfecto para poder crear las piezas bicomponente. A la hora de verter el polvo en el molde se puede añadir una parte PTFE virgen por un lado y se puede añadir el polvo de PTFE con aditivo por otro lado, formando distintas capas.

El PTFE prensado se extrae con cuidado del molde. Se puede utilizar pistones y la propia prensa hidráulica para ejercer la fuerza suficiente para extraerlo. El material se tendrá que manejar con relativo cuidado ya que solo es polvo prensado, es muy dúctil y se puede romper y deformar con un ligero golpe. Para transformarlo en una pieza rígida se debe sinterizar.

2.3.2.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE SINTERIZADO DEL PTFE.

El PTFE se puede sinterizar ya que no tiene un punto de fusión definido, a partir de los 327°C cambia de estado sólido a un estado gelatinoso translúcido que permite la movilidad de las cadenas poliméricas pudiendo unirse entre sí por fuerzas de Van der Waals. Por tanto, sinterizar el material consiste en aplicar temperatura al PTFE prensado para que alcance el “estado de gel” y se una molecularmente en un sólido rígido. Se aplica la temperatura gradualmente para asegurar un sinterizado uniforme. Tras la etapa de horneado el PTFE en polvo prensado se convierte en una pieza sólida con la misma forma del molde utilizado en la etapa de compresión. Apenas se notarán unas contracciones y dilataciones propias del material (Andena y col., 2004).

Las etapas a seguir se describen a continuación junto con la **Figura 4**, donde se muestra la curva de temperaturas en función del tiempo para el proceso de sinterizado. Las etapas son:

1. *Calentamiento de temperatura ambiente hasta 300°C.*
2. *Mantener a 300°C durante un tiempo.*
3. *Calentamiento desde 300°C hasta 370°C.*
4. *Mantener en la temperatura de sinterizado (370°C) durante un tiempo.*
5. *Enfriamiento desde 370°C hasta 300°C lentamente.*
6. *Enfriamiento desde 300°C hasta temperatura ambiente.*

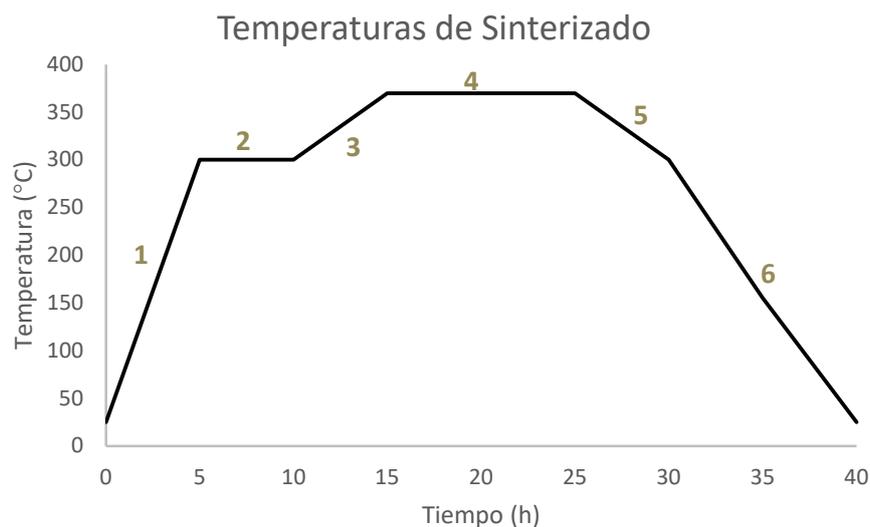


Figura 4. Gráfica de temperaturas del proceso de sinterizado y sus etapas.

En la **etapa 1** se calienta el horno hasta una temperatura inferior a la de fusión. En la **etapa 2** se mantiene la temperatura durante un tiempo para que el material adquiriera la energía de forma homogénea, si no se hace esta etapa la parte interior del material se queda más frío y puede que el proceso genere deformaciones. En la **etapa 3** se aumenta la temperatura del horno lentamente hasta el punto de fusión. En la **etapa 4** se mantiene la temperatura para que todo el material llegue al punto de fusión. En la **etapa 5** se disminuye muy lentamente la temperatura para que el PTFE solidifique homogéneamente, esto se debe realizar para evitar deformaciones externas y para obtener la mayor cristalinidad posible en la estructura molecular. Por último, en la **etapa 6** se disminuye la temperatura del horno hasta alcanzar la temperatura ambiente (Andena y col., 2004).

Las etapas descritas son siempre iguales para cualquier tipo de horno, cualquier cantidad de material y para cualquier forma de los conformados, lo único que varía es el tiempo. El proceso se puede optimizar para poder disminuir estos tiempos al máximo. En este estudio no se va a optimizar el proceso de sinterizado ya que los hornos se utilizan en la transformación de muchas piezas distintas en cantidades muy variables. Se va a emplear un ciclo genérico que asegura que el proceso se va a realizar con éxito independientemente del tipo y de la cantidad de piezas.

2.4. DESCRIPCIÓN DE LAS PIEZAS BICOMPONENTE DE PTFE Y SU FABRICACIÓN.

Las piezas bicomponente de PTFE son elementos fabricados con PTFE virgen y PTFE cargado con algún aditivo, como fibra de vidrio o grafito, separados en dos o más capas. El aditivo solo se encuentra presente en una región de la pieza, de forma que solo esa región presentará las características del aditivo y el resto de la pieza tendrá las propiedades del PTFE virgen.

Las piezas bicomponente se fabrican mediante el proceso de moldeo por compresión y sinterizado tal y como se muestra en la **Figura 5**. Durante el moldeo se añade el polvo de PTFE virgen y el polvo de PTFE cargado formando capas (1). Tras el prensado (2) y sinterizado de las capas se obtiene un macizo en bruto sólido (3) que se mecanizará para fabricar la pieza bicomponente (4).

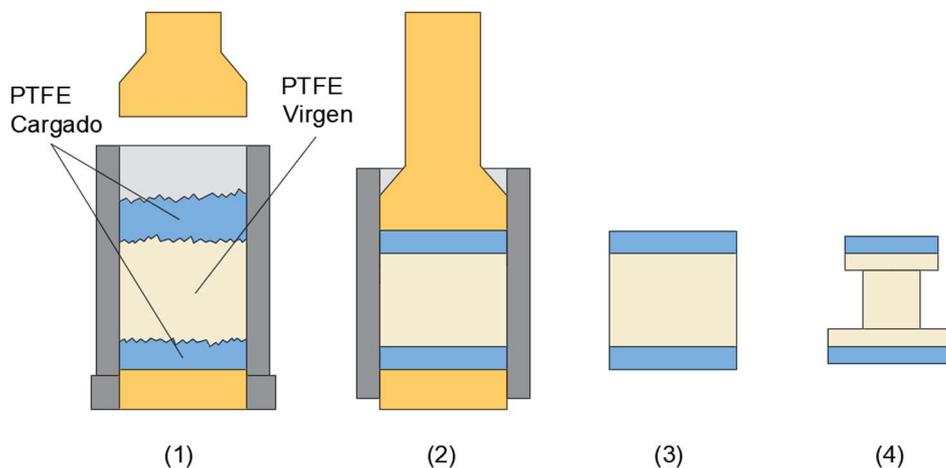


Figura 5. Representación del proceso de fabricación de piezas bicomponente.

Este tipo de piezas son fruto de la necesidad de proteger el material en ciertas zonas de la pieza por las condiciones de trabajo a las que se somete. Se fabrican tras probar la pieza fabricada en su totalidad de PTFE virgen y detectar algún desgaste o rotura en una zona concreta. De modo que cargando solo esa zona con un aditivo se puede fortalecer, mientras que el resto de la pieza sigue teniendo las propiedades del PTFE virgen. La necesidad de fabricar piezas con el aditivo en zonas concretas surge también por no poder utilizar el aditivo en toda la pieza, ya sea por corrosión, por temperatura o por que vuelven demasiado rígido el material.

En la industria son poco frecuentes ya que se utilizan en situaciones muy concretas y puntuales, pero son elementos que solventan problemas muy complejos y técnicos con mucha facilidad.

2.5 MECANIZADO DE PIEZAS DE PTFE.

El PTFE transformado por extrusión o por sinterizado se mecaniza para darle la forma a las piezas finales. Esta es la etapa más lenta y determinante del proceso. Se coloca el material sinterizado en un centro de control numérico (CNC) sujetado por unas garras, se hace girar el material mediante revolución y se mecaniza con las herramientas pertinentes para cada tipo de proceso. En la **Figura 6** podemos ver una representación del proceso.

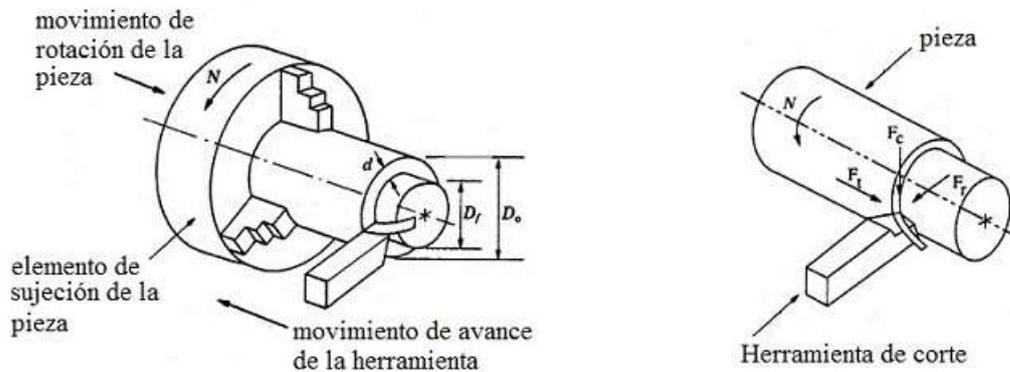


Figura 6. Esquema del proceso de mecanizado de piezas de PTFE. (*Fundamentos de Los Procesos de Mecanizado*, n.d.)

Puede llegar a ser el proceso determinante, puesto que es la etapa que da la forma final a la pieza con las medidas y tolerancias especificadas por el cliente. Es el proceso más costoso y elaborado, sobre todo por los procesos de desbaste. Al partir de material sinterizado macizo hay que eliminar las zonas más densas de material sobrante, este proceso se realiza con una herramienta de corte eliminando material, capa tras capa, hasta acercarse a las dimensiones finales. Por último, se elimina con mayor precisión el poco material sobrante para dar el acabado final.

El desbaste es simplemente para eliminar material sobrante del tubo o barra de partida y se hace con velocidades de mecanizado altas y herramientas poco precisas. Luego, se mecanizan las dimensiones de la pieza con velocidades de trabajo más lentas y con herramientas más precisas para obtener la pieza terminada. Si en el proceso de moldeo se utiliza un molde con la forma ajustada a la pieza final se reduce mucho material sobrante, disminuyendo considerablemente los tiempos de mecanizado y el material desechado.

Para poder trabajar con seguridad la pieza debe tener una zona de agarre. Esta zona se añade en el proceso de moldeo y sinterizado. De esta forma, en el CNC la pieza tendrá suficiente longitud para agarrarse con seguridad y poder tronzarse con la herramienta de corte, sin golpear el elemento de sujeción ni impactar la máquina. Esta zona de agarre puede variar entre los 15 mm y 20 mm, dependiendo de las herramientas y las garras que se utilicen. Al terminar el proceso de mecanizado la zona de agarre se desechará, por lo que conviene que sea lo más pequeña posible para no desperdiciar material.

2.6. OPTIMIZACIÓN DEL MOLDEO POR COMPRESIÓN.

En la industria se producen tubos, barras o cilindros de diferentes diámetros y longitudes por el proceso de moldeo por compresión y sinterizado. Se obtienen mediante moldes cilíndricos genéricos y constituyen la base para mecanizar todo tipo de piezas. Estas piezas son tan variadas que en ocasiones no se ajustan a los moldes genéricos, por lo que se desperdicia mucho material durante el mecanizado.

En este estudio se considera una de esas piezas, la cual se mecaniza a partir de un cilindro macizo de PTFE desperdiciando mucho material. Esto se traduce en tiempos de mecanizado muy elevados y en material transformado que no se va a utilizar.

Para reducir los tiempos de mecanizado y reducir material desechado se puede diseñar un molde para obtener preformas ajustadas a la pieza. En la **Figura 7** se muestra la pieza del estudio dentro del cilindro y dentro de la preforma ajustada, con las zonas que se van a desbastar en cada caso.

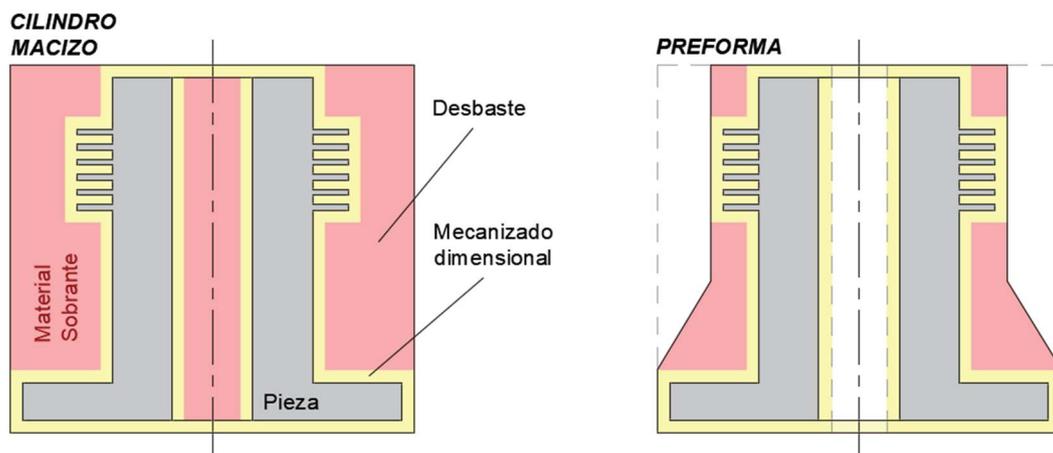


Figura 7. Esquema en sección de las diferencias de material sobrante, entre un cilindro macizo y una preforma, para la pieza del estudio.

Como podemos observar, con la preforma se elimina mucho material sobrante en el exterior, eliminando una amplia zona de desbaste. Además, se elimina material añadiendo un agujero pasante.

Cada pieza tiene unas dimensiones y se podrá ajustar la preforma en mayor o menor medida. Además, las preformas se obtienen diseñando moldes específicos que solo servirán para un tipo de pieza concreto. Elaborar el molde específico para una única pieza es mucho más costoso que utilizar moldes genéricos, por lo que solo será rentable si la producción es muy alta.

3. OBJETIVOS

El objetivo general del trabajo es mejorar el proceso de producción para lograr una pieza bicomponente de PTFE funcional y reducir el tiempo de fabricación de la misma.

Para lograr ese objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Optimizar el diseño de un molde ajustado al contorno de la pieza final
- Optimizar el moldeo de una pieza bicomponente PTFE y fibra de vidrio al 25 %
- Valorar económicamente la reducción de los costes de producción y el coste de realización del estudio

Como ya se ha dicho, este estudio tiene dos objetivos distintos. En primer lugar, se va a optimizar el proceso de moldeo por compresión de PTFE diseñando un molde, junto con el resto de elementos del proceso, para obtener una preforma que se ajuste al contorno de la pieza final. Con ello se pretende reducir el material sobrante y los tiempos de mecanizado. En segundo lugar, se va a modificar el proceso de moldeo de la pieza para añadir fibra de vidrio al 25% en la parte superior, obteniendo así una pieza bicomponente con una mayor resistencia a la fricción y un menor desgaste en la zona cargada con la fibra de vidrio.

4. METODOLOGÍA

4.1. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE MOLDEO.

El elemento determinante del proceso es el molde, pero para poder determinar sus dimensiones hay que partir de la pieza final para dimensionar la preforma y luego se partirá de la preforma para diseñar el molde y el resto de elementos del proceso, tal y como se muestra en la **Figura 8**:

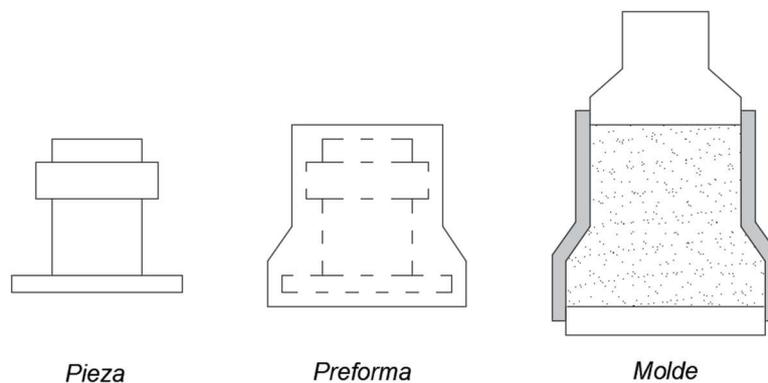


Figura 8. Representación del proceso de diseño.

La metodología a seguir va a ser la siguiente: en primer lugar, se va a realizar un esbozo de la preforma determinando qué partes son esenciales para el proceso. En segundo lugar, se van a determinar los diámetros y las alturas. Tras obtener las dimensiones se calculará el volumen de la preforma por zonas y se determinará la masa de material que se necesita en cada una. Sabiendo las masas de las distintas zonas se calculará la altura del molde para poder albergar dicha masa en polvo de PTFE. Por último, se diseñará el proceso de moldeo calculando las presiones de trabajo y el recorrido de prensado, además de definir los pistones, levantes, topes, empujadores y demás elementos necesarios para que el proceso se lleve a cabo.

En la **Figura 9** se representa el diagrama de bloques con los distintos pasos de la metodología para la optimización del proceso de moldeo, junto con un pequeño esquema visual.

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE MOLDEO:

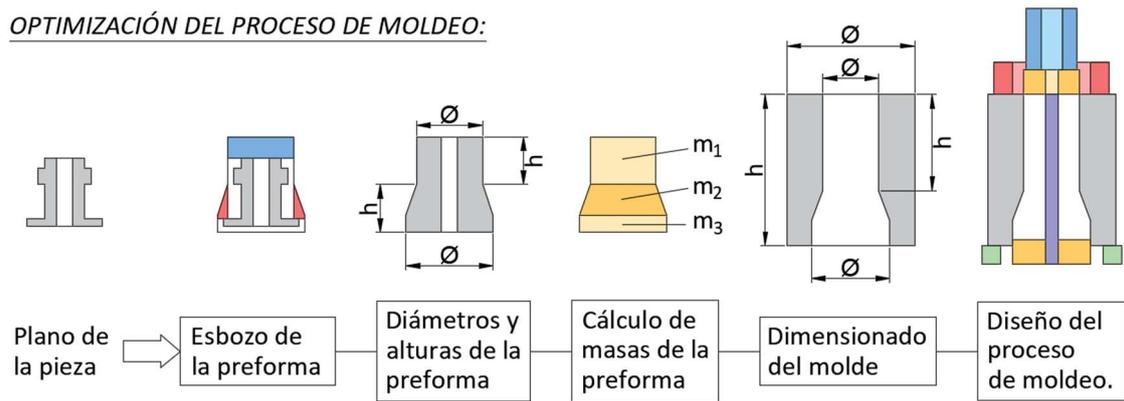


Figura 9. Diagrama de bloques de la optimización del proceso de moldeo.

4.1.1 ESBOZO DE LA PREFORMA.

Se realiza el diseño de la preforma teniendo en cuenta todos los factores que pueden influir en la fabricación posterior de la pieza, y que afectan tanto a la funcionalidad de la preforma como al moldeo de la misma.

Se va a partir de la pieza final y se van a ir añadiendo estos factores para construir el cuerpo de la preforma sin calcular las dimensiones exactas, en una primera aproximación.

4.1.2 CÁLCULO DE DIÁMETROS Y ALTURAS DE LA PREFORMA.

La preforma tendrá las dimensiones del molde tras la compresión, ya que solo es polvo prensado. Sin embargo, la preforma contraerá en diámetro y dilatará en altura tras el sinterizado, debido al tratamiento térmico. En la **Figura 10** se representa dichas contracciones y dilataciones esperadas tras aplicar la temperatura.

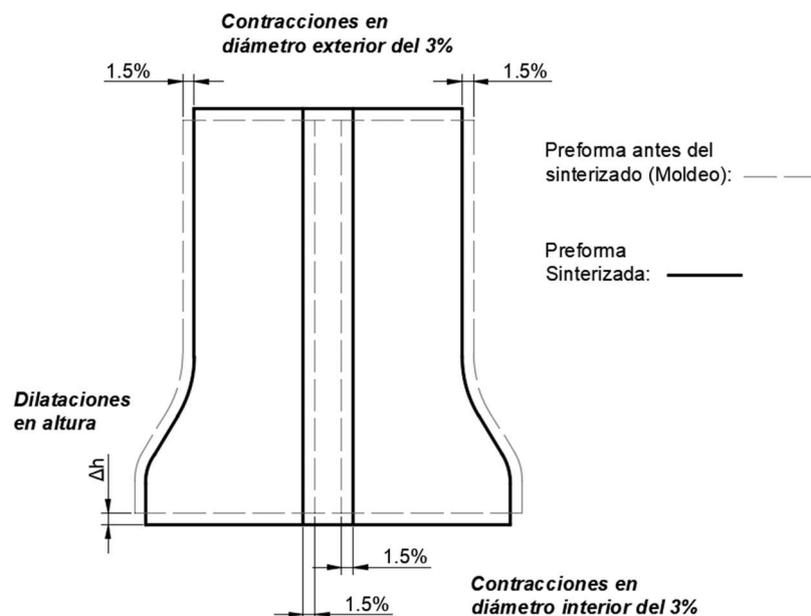


Figura 10. Esquema en sección de las contracciones y dilataciones tras el sinterizado de la preforma.

Los diámetros contraerán hasta un máximo del 3% (*1.5% en radio*) tanto en el exterior como en el interior. Además, las alturas también dilatarán hasta un máximo del 3%. Esto no quiere decir que el material se termine comportando de esta manera. Estos porcentajes son los casos más desfavorables de contracción y dilatación, por tanto, las dimensiones reales se encontrarán entre el 0% y el 3% como máximo.

Al haber un cambio tras el tratamiento térmico **es importante diferenciar entre las dos preformas, la preforma en crudo y la sinterizada**. La primera tiene las mismas dimensiones que el molde ya que es la que se obtiene tras prensar el polvo. La segunda preforma contraerá en diámetro y dilatará en altura al sinterizarla. Ambas son importantes, la preforma sinterizada es el objetivo del estudio y para obtenerla necesitamos el molde, el cual se va a dimensionar a partir de la preforma en crudo.

Por tanto, se van a calcular las dimensiones para ambas preformas teniendo en cuenta las contracciones y dilataciones nombradas. En primer lugar, para calcular los diámetros exteriores se parte de la pieza terminada, se añade el 3% de contracciones y se suma un milímetro extra. Por último, se redondea al número entero siguiente y así se obtiene los diámetros de la preforma antes del sinterizado. De esta forma se asegura que tras el tratamiento térmico se tenga más de un milímetro de material para poder mecanizar los diámetros de la pieza. Se representa esquemáticamente en la **Figura 11**.

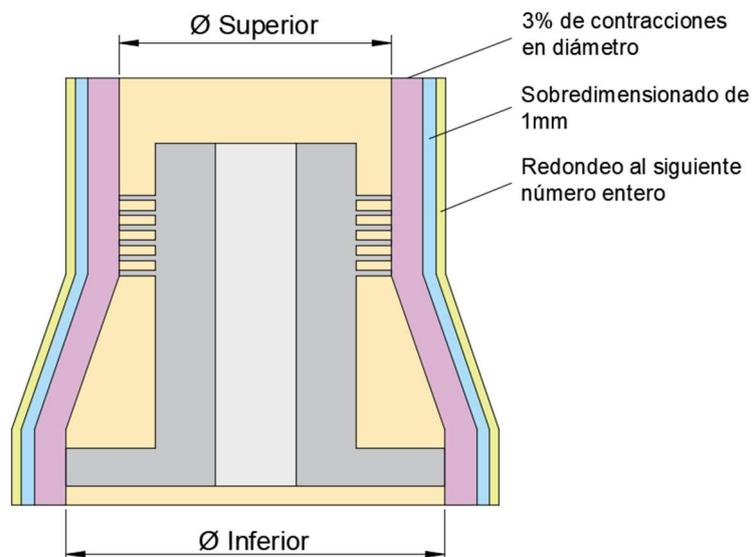


Figura 11. Representación de los pasos para calcular los diámetros de la preforma.

Solo se añade un milímetro extra ya que, al ser las contracciones del 3% el caso más desfavorable, en la práctica dichas contracciones es muy difícil que lleguen al 3%. Por tanto, con el sobredimensionado y el milímetro añadido se tiene suficiente material para poder mecanizar la pieza tras el sinterizado. Además, se redondea a un número entero por compatibilidad y sencillez, ya que todos los demás moldes utilizados en la empresa tienen diámetros exactos, de este modo se podrán utilizar los pistones de otros moldes en caso de que sea necesario.

Por último, se utilizará un vástago genérico de 10 mm para hacer el diámetro interior. De esta forma no se tendrá que mecanizar uno a medida y se reducirán los costes de inversión. Tras los resultados se determinará si es conveniente ajustar con mayor precisión el diámetro interior.

Para las alturas de la preforma se van a añadir 3 mm a cada superficie horizontal de la pieza terminada. También se añadirá una zona de agarre en la parte superior de 16.2 mm para tener suficiente longitud, ya que la mínima altura necesaria para poder trabajar es de 15 mm. Por último, la zona de cambio de diámetro se establecerá a la altura necesaria para que el ángulo de cambio sea de 20 grados. En la **Figura 12** se representan los parámetros para calcular las alturas.

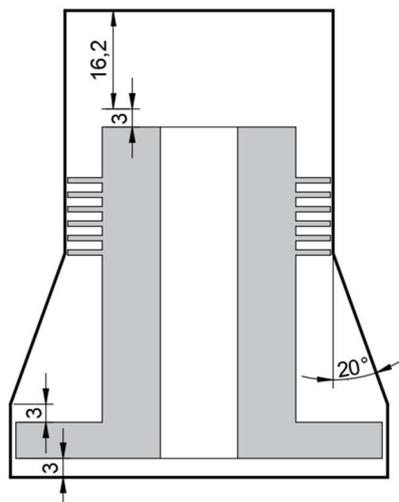


Figura 12. Parámetros para calcular las alturas de la preforma sintérisada.

Las dimensiones no se han obtenido para la misma preforma. Por un lado, los diámetros se han calculado para la preforma en crudo, ya que se han tenido en cuenta las contracciones en el sobredimensionado. Por otro lado, las alturas se han calculado para la preforma sintérisada, ya que no se han tenido en cuenta las dilataciones y se ha sobredimensionado en función del mecanizado. Por tanto, se tendrán que restar las contracciones del 3% para obtener los diámetros de la preforma sintérisada, así como restar las dilataciones para obtener las alturas de la preforma en crudo. Con ello se tendrán todas las dimensiones para ambas preformas y se podrá pasar a la siguiente etapa del proceso.

Las alturas se podrán modificar muy fácilmente y por ello se han diseñado con un mayor margen. Reduciendo la cantidad de material durante el prensado se podrán reducir las alturas en los extremos de la preforma.

4.1.3 CÁLCULO DE MASAS.

Se va a dividir el cuerpo de la preforma en tres secciones distintas, tal y como se muestra en la **Figura 13**, y se va a calcular la masa para cada una. Para ello, se van a utilizar las dimensiones de la preforma en crudo para obtener los volúmenes de las tres zonas. Luego, usando la densidad del PTFE se calculará la masa de PTFE que es necesario añadir para cada uno de los volúmenes anteriores. Estas masas representan la cantidad de material que debe introducirse en el molde para poder conformar la preforma.

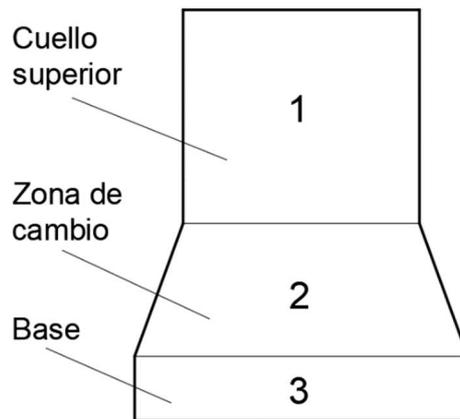


Figura 13. División de las secciones de la preforma.

El polvo de PTFE tiene una densidad aparente mucho menor que el PTFE transformado, por tanto, el volumen del molde tendrá que ser mucho mayor que el volumen de la preforma para poder albergar las masas de cada sección. En la **Figura 14** se representa como se van a aumentar los volúmenes en el molde para poder albergar todo el material necesario.

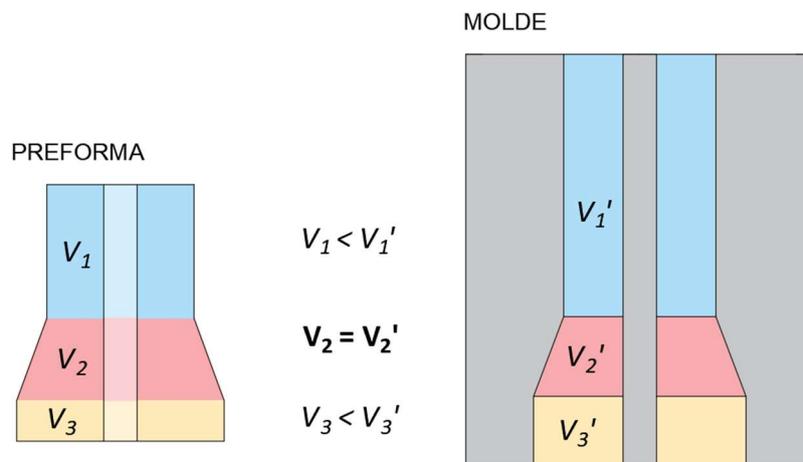


Figura 14. Diferencia de volúmenes entre la preforma en crudo y el molde.

Para el caso de V1 y V3 añadiendo mayor altura se aumenta el volumen para albergar la masa en polvo. Sin embargo, la zona central V2 no se puede modificar, por lo que el volumen será el mismo tanto en la preforma como en el molde. Al no poder modificarse la zona central la masa de polvo introducida será inferior a la masa que se necesita.

Para solucionar el problema se calculará la diferencia de masa entre el molde y la preforma en la sección 2 y ese exceso se añadirá en la sección 1. Por tanto, la masa que falta en la zona central del molde se encontrará en la parte superior. De esta forma, durante el prensado se redistribuirán las masas, el exceso de la zona superior se desplazará hacia el centro del molde, conformando correctamente la preforma en crudo. El sobredimensionado de la sección 1 no solo deben albergar su masa, si no que deben albergar también la que falta en la sección 2.

4.1.4 DIMENSIONADO DEL MOLDE.

Los diámetros y las alturas del molde van a ser los mismos de la preforma en crudo, a excepción de las alturas para las secciones 1 y 3, tal y como ya se ha visto en el apartado anterior.

Para calcular las alturas se va a utilizar la densidad aparente del PTFE en polvo y la masa de ambas secciones para calcular sus volúmenes. Luego, se dividirán los volúmenes por el área circular de cada sección y se obtendrán las alturas. Por último, se añadirán unos centímetros de más a la base para encajar el pistón inferior durante el montaje.

Una vez calculadas las alturas de las secciones 1 y 3 ya se tendrán todas las dimensiones para fabricar el molde.

4.1.5 DISEÑO DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN.

4.1.5.1. DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL PROCESO.

Teniendo en cuenta el proceso de moldeo por compresión, se fijarán las condiciones necesarias para cada uno de los elementos del mismo (pistones, vástago, empujador, levante y tope) tanto de dimensiones como de materiales y acabado superficial. La función principal de estos elementos se indica a continuación:

El **molde** es el elemento principal del proceso, su finalidad es obtener las dimensiones exteriores de la preforma.

Los **pistones** son los elementos que transmitirán la presión directamente sobre el material.

El **vástago interior** es el encargado de que la preforma tenga el orificio interior.

Los **levantes** se utilizan para que el pistón inferior no actúe durante el primer prensado, evitando que ejerza presión antes de tiempo.

El **empujador** no es más que un cilindro que transmite la presión al pistón superior. Tiene la altura exacta para que la prensa toque el tope cuando llegue al final del recorrido y el pistón superior ya no avance más. De esta forma se asegura la dimensión de la preforma en la parte superior.

Por último, el **tope** es un cilindro que sirve para dejar de transmitir la presión al pistón superior y transmitirla al pistón inferior, protegiendo al molde de la acción directa de la prensa.

4.1.5.2. CÁLCULO DE LAS PRESIONES DE TRABAJO.

El PTFE en polvo se debe prensar entre los 200 y 500 kg/cm² para que el material sea sinterizado correctamente. Por un lado, si se prensa por debajo del rango el PTFE resultante no tendrá la densidad correcta, ni las propiedades mecánicas que se espera de él. Por otro lado, si se prensa por encima del rango se cizallará el material y la preforma saldrá rota del molde.

Hay dos pistones que ejercerán la presión sobre el material, el pistón superior tiene menos superficie que el pistón inferior, por lo que habrá que calcular dos presiones de trabajo. Lo ideal es aplicar la máxima presión sin pasarse del límite de 500 kg/cm^2 , pero como se va a ejercer la presión de forma desigual, primero con el pistón superior y luego con el inferior, se va a tomar un valor intermedio de 320 kg/cm^2 . De esta forma, no se excederá en ningún momento el límite, aunque una zona quedase más comprimida que otra.

Para trabajar se va a calcular la fuerza que se debe ejercer para ambos pistones multiplicando la superficie de cada uno por los 320 kg/cm^2 . Se obtendrán los dos datos en toneladas, ya que son las unidades con las que se trabajará en la prensa hidráulica. La fuerza que habrá que aplicar con el pistón inferior será mucho mayor a la del pistón superior, debido a la diferencia de superficies. Las toneladas serán distintas, pero al repartirlas entre las distintas superficies la presión será la misma, 320 kg/cm^2

4.1.5.3. PROCEDIMIENTO DE MOLDEO Y DESMOLDEO.

Se definirán las condiciones del procedimiento de moldeo y desmoldeo basándose en la experiencia y en las visitas de campo realizadas.

Una vez finalizado el proceso de diseño, se procede a fabricar la pieza y se mostrará la misma, así como un análisis del resultado respecto de lo inicialmente planteado con el fin de validar el procedimiento de diseño obtenido.

Se espera que la pieza tenga desviaciones contrayendo en diámetro y creciendo en altura, no más del 3% predicho por el proveedor del material. Si los cálculos son correctos y el material se comporta dentro de lo esperado la preforma debería de ser ligeramente más grande que la pieza mecanizada. Si los diámetros o las alturas de la preforma difieren demasiado de lo esperado, es decir, son demasiado pequeños, no se podrá fabricar la pieza final y el molde no será válido. En ese caso, habría que plantear una modificación del molde o directamente fabricar otro nuevo con las conclusiones extraídas de la prueba real.

4.2. OBTENCIÓN DE LA PREFORMA BICOMPONENTE.

Para la obtención de la preforma bicomponente es necesario seguir las etapas que se indican en los siguientes subapartados.

Se van a realizar dos pruebas para estudiar su viabilidad, tal y como se muestra en la **Figura 15**. En primer lugar, se va a obtener la preforma dividida en dos capas, una con el PTFE virgen y otra con la carga de fibra de vidrio (1). En segundo lugar, se va a obtener la preforma con una franja de fibra de vidrio intercalada, formando tres capas de material (2). Estas dos pruebas se van a realizar con el objetivo de observar cual es la mejor forma de obtener la pieza bicomponente, ya que el primer caso (1) es el método más sencillo, mientras que el segundo (2) es más económico, ya que el teflón con fibra de vidrio es mucho más caro que el virgen.

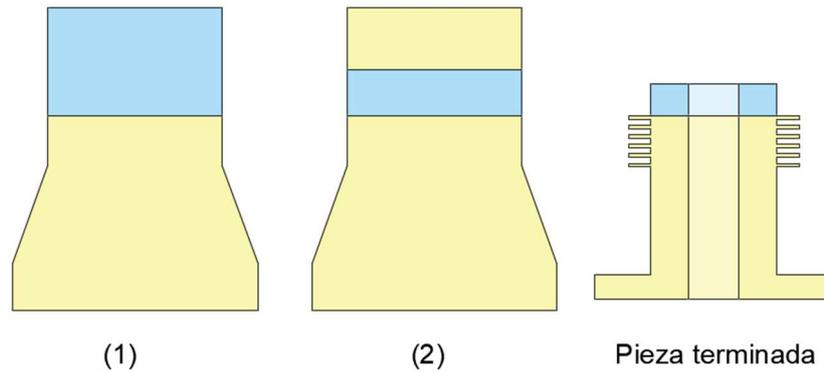


Figura 15. Representación de la adición del aditivo en la preforma para la fabricación de las piezas bicomponente.

4.2.1 CÁLCULO DE MASAS POR CAPA.

Tal y como se muestra en la **Figura 16**, se va a establecer una altura de aditivo desde la parte superior hasta el primer anillo de la pieza (h). Se establece este punto para saber cuan precisos se puede llegar a ser y para comprobar fácilmente la horizontalidad y homogeneidad del cambio, gracias al anillo.

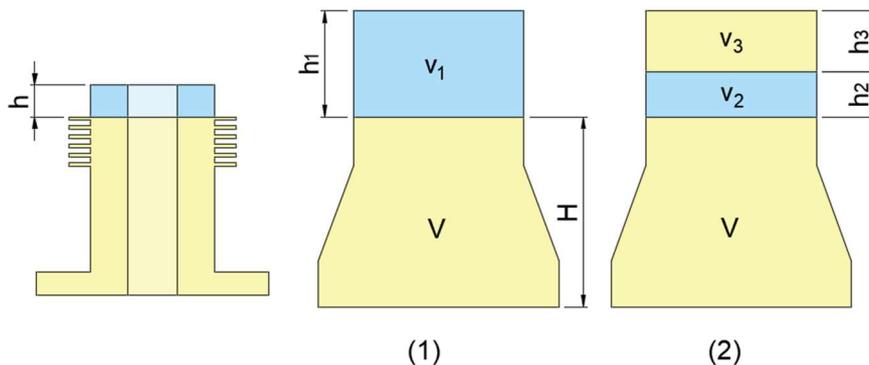


Figura 16. Representación de las alturas y volúmenes en la adición del bicomponente.

Sabiendo la altura del aditivo en la pieza (h) se puede saber las alturas de las secciones de ambas preformas. Para ello, solo hay que tener en cuenta los sobredimensionados y la zona de agarre de la preforma.

Una vez se tienen las alturas, para las dos opciones, se calculan los volúmenes utilizando las dimensiones de la preforma. Hay que tener en cuenta que la altura " h_2 " debe de estar ligeramente por encima que la altura " h ".

El último paso es calcular las masas a partir de los volúmenes multiplica por la densidad del correspondiente material. Para ello, se emplearán los datos de densidades proporcionados por el proveedor para PTFE virgen y para el PTFE cargado con 25% de fibra de vidrio.

4.2.2 CÁLCULO DE LAS PRESIONES DE TRABAJO.

El PTFE en polvo se debe prensar entre los 200 y 500 kg/cm² mientras que el PTFE cargado tiene un rango de presiones de 400 a 500 kg/cm². Por tanto, aplicando una presión de 400 kg/cm² se está dentro de ambos rangos y se asegura no sobrepasar la presión límite de 500 kg/cm².

Realizando el producto de los 400 kg/cm² por las superficies (en cm²) del molde, tanto la superior como la inferior, se obtendrán los kilogramos a aplicar. Se transforma a toneladas ya que son las unidades en las que trabaja la prensa hidráulica.

Las superficies son circulares y hay que restar la sección del vástago interior, por lo que la ecuación para calcular las presiones es la siguiente:

$$p = 400 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (d^2 - 10^2) \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde **d** corresponde al diámetro de la sección (en cm), ya sea la inferior o la superior, y **10²** corresponde a la sección del vástago interior que se debe restar.

4.2.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE MOLDEO.

El proceso de moldeo de las piezas bicomponente es el mismo que para las piezas normales, se utilizan los mismos elementos con la diferencia de que se deben pesar las capas y se añaden por orden en el molde, tal y como se muestra a continuación.

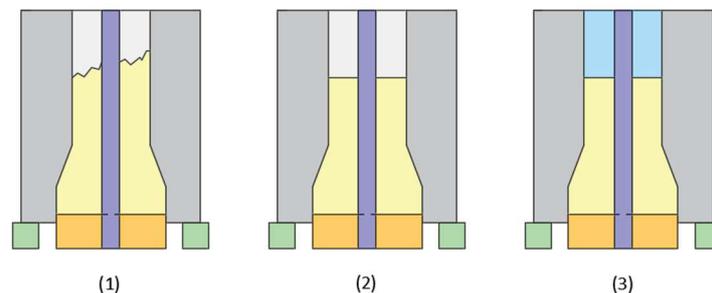


Figura 17. Representación de la adición de las capas para el prensado de la primera opción de la preforma bicomponente, solo dos capas.

En la **Figura 17** se representa como se deben añadir las capas para la primera opción, la preforma con solo dos capas. En primer lugar, se añade la masa exacta de PTFE virgen para la primera capa (1). En segundo lugar, con una espátula alargada, se nivela la superficie y se prensa ligeramente para tratar de homogeneizar la unión de ambas capas (2). Por último, se añade la masa de PTFE con la fibra de vidrio para la segunda capa (3). El polvo de PTFE con fibra de vidrio tiene una densidad menor a la del PTFE virgen, por lo que la masa de la segunda capa no cabrá por completo en el volumen del molde. Prensando manualmente con la ayuda del pistón superior se podrá ganar suficiente espacio para verter toda la masa.

La adición del bicomponente solo es una prueba para tratar de aumentar la vida útil de la pieza. Es posible que la adición de la fibra de vidrio no resulte en una mejora y las piezas se tendrían que fabricar en PTFE virgen, sin la capa bicomponente. Por ello, el molde se ha diseñado para

fabricar la preforma en PTFE virgen y al adicionar el aditivo no cabe dentro del molde. Esto no es un problema, ya que el material es muy compresible y se va a prensar ligeramente para ganar el espacio que falta. De esta forma, con el coste de fabricar un solo molde se puede optimizar el proceso y hacer las pruebas con el aditivo.

Para obtener la preforma bicomponente con tres capas se sigue un proceso análogo al anterior. Se va vertiendo las masas de cada capa y se van homogeneizando con una espátula manualmente. Al llegar a la última capa se tendrá que prensar manualmente con el pistón superior, para ganar el volumen que falta, y poder verter toda la capa. En la **Figura 18** se representa esquemáticamente el proceso.

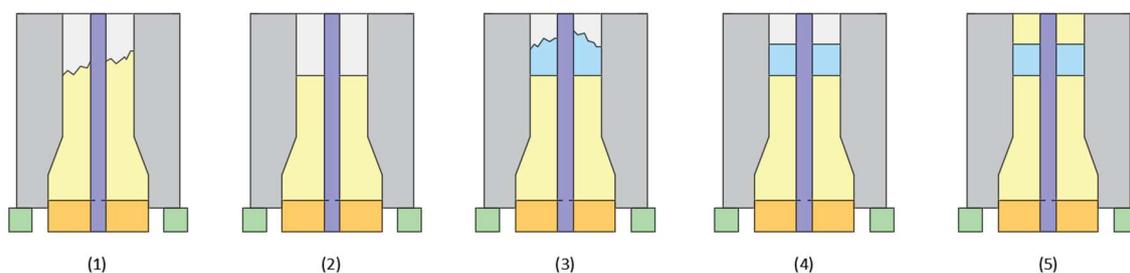


Figura 18. Representación de la adición de las capas para el prensado de la segunda opción de la preforma bicomponente, tres capas.

Por último, una vez añadidas todas las capas se colocan todos los demás elementos del proceso y se aplicará la presión necesaria.

4.3. VALORACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN

Es importante remarcar que el molde, al ser una prueba, se va a fabricar en la empresa acorde a los materiales y medidas descritas en el apartado de cálculos. Se va a mecanizar a partir de bloques macizos en un torno de control numérico CNC. Para verificar las dimensiones se va a emplear un pie de rey y se van a tomar tolerancias al alza. Es decir, durante la fabricación las medidas se aceptarán con unas centésimas por encima de margen, tanto en diámetro como en altura. Las tolerancias se toman al alza para asegurar que hay suficiente PTFE en la preforma para el mecanizado.

El proceso de moldeo de las preformas se va a realizar en una sala aislada y limpia de polvo, con una prensa hidráulica unidireccional. El proceso requiere que el aire y el ambiente esté limpio para evitar manchas negras e impurezas tras el sinterizado. Las preformas se verificarán visualmente tras el prensado, comprobando que no salgan rotas del molde ni con impurezas visuales. Además, las preformas en crudo presentarán una rebaba propia del prensado que deberá ser quitada a mano antes de meterlas en el horno. Las medidas de la preforma se verificarán con un pie de rey tras el sinterizado, antes son demasiado frágiles para tomarse con precisión, el pie de rey las rompería con facilidad.

Por último, se registrarán los tiempos de llenado y prensado del proceso, para poder compararlos con los tiempos de llenado de los moldes sin optimizar y sin capa bicomponente. Además, se medirán los tiempos de mecanizado a partir de las preformas optimizada. Al reducir material de la preforma debería de mecanizarse la pieza final con mayor rapidez.

5. RESULTADOS

5.1. RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE MOLDEO.

5.1.1 ESBOZO DE LA PREFORMA

A partir de la pieza final deseada, se realiza el esbozo de la preforma. Las condiciones que afectan al diseño son las siguientes:

-La pieza debe de obtenerse mecanizando todas sus caras. Es decir, la preforma debe contener la pieza por completo en su interior. Para ello se añade un sobredimensionado a partir de cada una de las superficies de la pieza, tanto exteriores como interiores.

-El mecanizado requiere de una zona de agarre para poder colocar la preforma en el elemento de sujeción durante el mecanizado. Esta zona se añadirá sobre el diámetro más pequeño, de esta forma tendrá un menor volumen y se desperdiciará una menor cantidad de material.

- El diseño no puede tener esquinas cortantes, de lo contrario la preforma se romperá durante el proceso de compresión. Por ello, se redondearán todas las esquinas del interior del molde para mayor seguridad. De esta forma se suprimen todas las esquinas cortantes y se asegura que el material se moverá libremente por el molde al ejercer presión.

- Dado que el diámetro superior va a ser más pequeño que el inferior, para salvar la diferencia de dimensiones, y evitar la mala distribución de la presión, se va a añadir una zona de cambio de diámetro.

En la **Figura 19** se representa esquemáticamente todos los factores nombrados. Estos son: adición en la parte superior de una zona de agarre, adición de sobredimensionados en el exterior y en el interior de la pieza, adición de una zona de cambio de diámetro y, por último, redondeo de las esquinas.

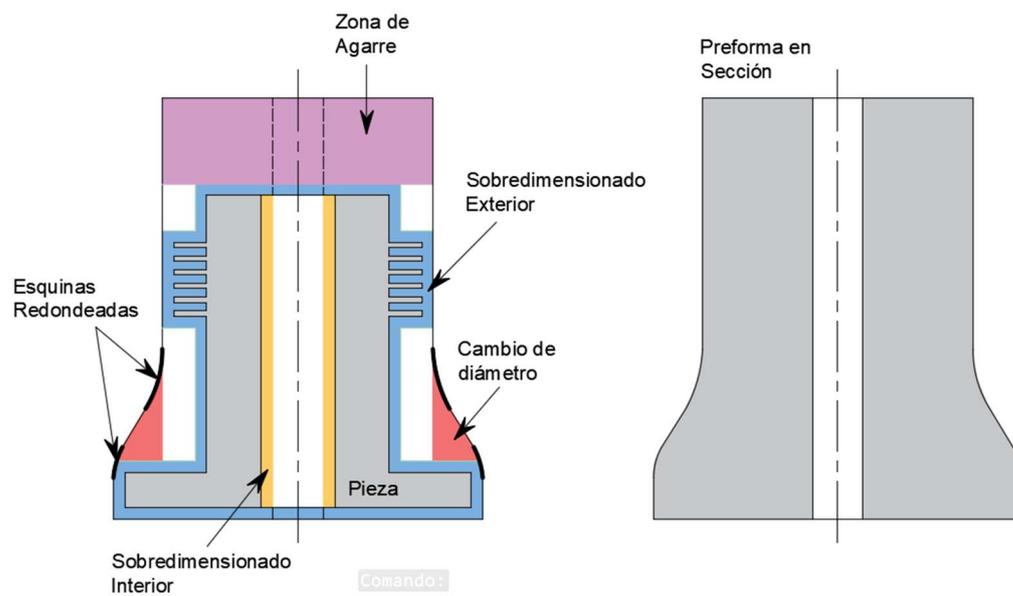


Figura 19. Esquema en sección de la preforma con los factores para ajustarse a la pieza.

Teniendo en cuenta estos parámetros ya se pueden calcular los diámetros y las alturas.

5.1.2 DIÁMETROS Y ALTURAS DE LA PREFORMA.

Se han calculado los diámetros y alturas teóricos según la metodología descrita. En el caso de los diámetros se ha partido de la pieza final y se han añadido las contracciones y los sobredimensionados pertinentes. El diámetro interior será de 10mm dado que se va a usar un vástago estándar, por lo que solo se va a comprobar que tras el sinterizado habrá suficiente material para mecanizar la pieza. En la **Tabla 1** se muestran los valores teóricos.

Tabla 1. Valores de los diámetros calculados según la metodología.

	PIEZA	Contracción 3%	Pieza + contracción	mm extra	Redondeo	Molde / Preforma en crudo
Ø Superior (mm)	42.8	+1.35	44.15	45.15	45	45
Ø Inferior (mm)	59.7	+1.89	61.59	62.59	63	63
Ø Interior (mm)	12.7	+0.3	10.3	-	-	10

La primera columna corresponde a los diámetros de la pieza terminada. La segunda columna corresponde al sobredimensionado que se va a aplicar del 3% para salvar las máximas contracciones teóricas. La tercera columna corresponde a los diámetros con el sobredimensionado añadido. En la cuarta columna se añade un milímetro extra por precaución.

Por último, se redondea el valor para simplificar y esos son los datos definitivos que se tomarán para el molde y la preforma en crudo.

Cabe destacar que la fila del diámetro interior es distinta a los diámetros exteriores. Se ha visto que tras fabricarse la preforma con un vástago de 10mm la contracción solo será de 0,3mm y se podrá mecanizar hasta 12.7mm en el CNC.

En la **Figura 20** se representan las alturas calculadas para la preforma sinterizada, restando el 3% de dilataciones se obtendrán las alturas para la preforma en crudo. Por un lado, las alturas de la preforma sinterizada son importantes para saber si se puede mecanizar la pieza y, por otro lado, las alturas de la preforma en crudo son importantes para calcular el recorrido de prensado.

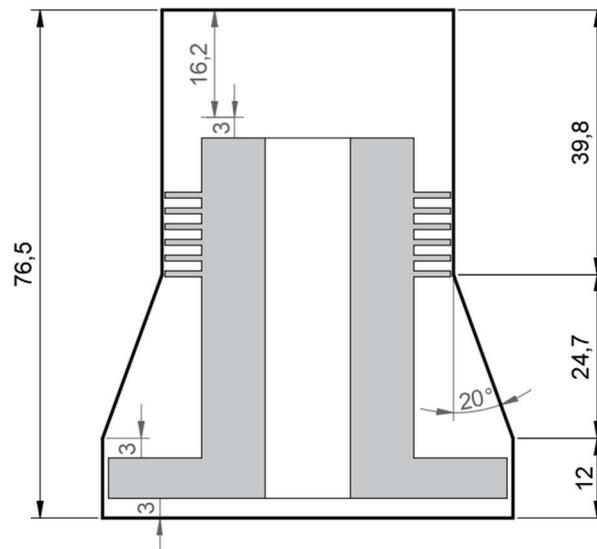


Figura 20. Representación de las alturas para la preforma sinterizada según la metodología, en mm.

Las dimensiones para ambas preformas se recogen a continuación, en la **Figura 21**. Las dimensiones entre paréntesis representan las obtenidas al restar las contracciones y dilataciones pertinentes, las demás son las calculadas directamente según la metodología.

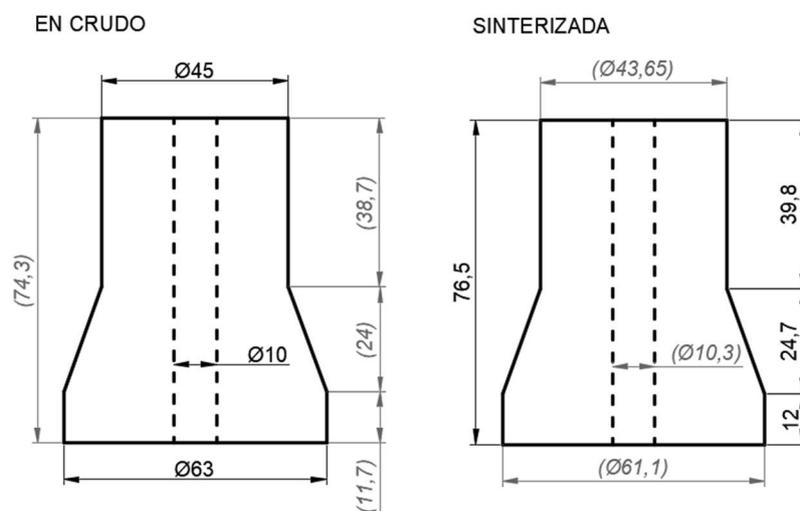


Figura 21. Dimensiones para ambas preformas según la metodología, en milímetros.

Cabe destacar que son dimensiones teóricas y se ha tenido en cuenta el caso más desfavorable. Las dimensiones reales esperadas estarán en torno a estos valores y se considerará más adelante si reducir las alturas y aumentar el diámetro del vástago interior. Los cálculos se han hecho a partir de las dimensiones de la pieza final, las cuales se encuentran en el *Plano 1, Dimensiones de la pieza terminada* en el apartado de *Planos*.

5.1.3 MASAS DE LA PREFORMA Y EL MOLDE.

A partir de las dimensiones de la pieza calculadas en el apartado anterior, se hallan los volúmenes de cada una de las 3 secciones y la masa que cabría en estos volúmenes. Teniendo en cuenta la densidad final del PTFE de 2.16 g/cm^3 . A continuación, en la **Figura 22** se muestran los volúmenes de la preforma en crudo y sus respectivas masas calculadas.

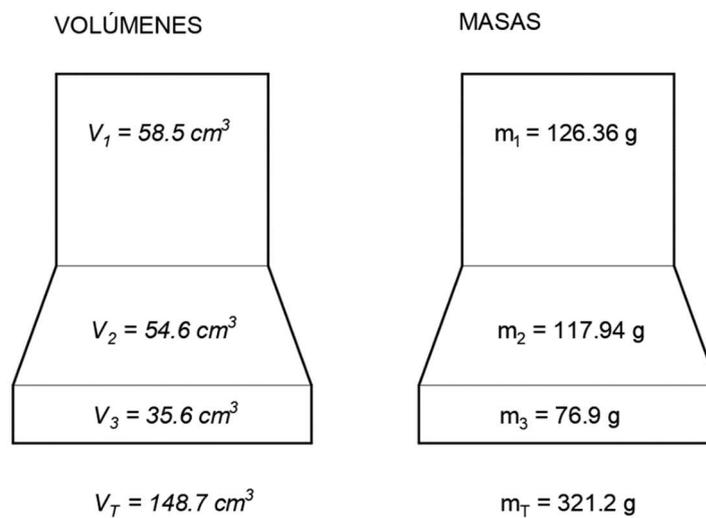


Figura 22. Volúmenes y masas de las distintas zonas de la preforma en crudo.

El molde tendrá un volumen en la zona de cambio V_2 de 54.6 cm^3 , al igual que la preforma en crudo. La masa que podrá albergar en la zona central será de 49.14 g , ya que la densidad aparente del PTFE en polvo es de 0.9 g/cm^3 . Por tanto, restando los 49.14 g a los 117.94 g , de la preforma en crudo, se obtienen unos 68.8 g que se redistribuirán en la zona superior del molde, V_1 , tal y como se muestra en la **Figura 23**.

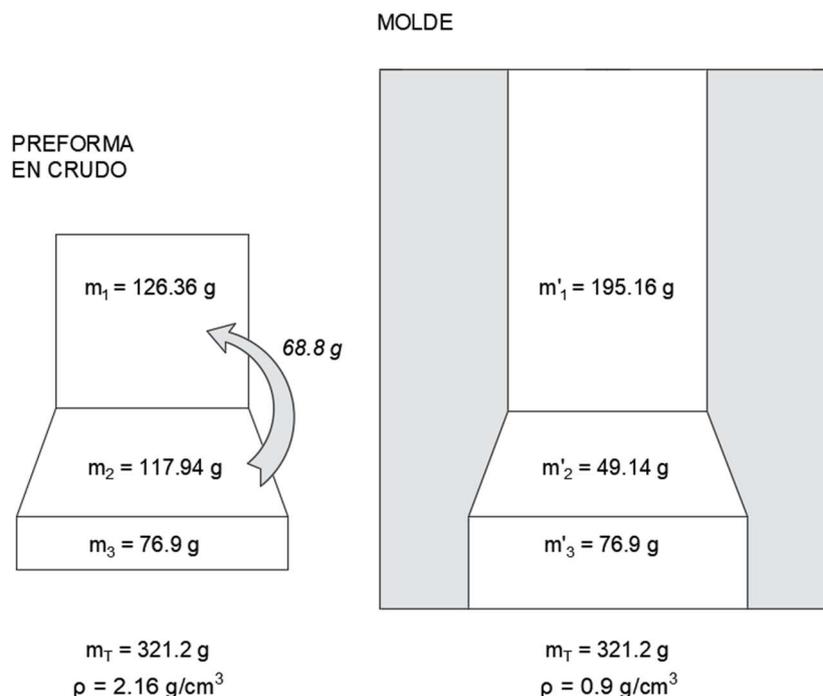


Figura 23. Redistribución de masas en el molde.

Tabla 2. Valores de volúmenes y masas de la preforma en crudo y del moldeo, según las distintas densidades.

	Zona 1 / Cuello superior	Zona 2 / Zona de cambio	Zona 3 / Base	Total
Volumen preforma (cm^3)	58.50	54.60	35.60	148.70
Masa prensada (g)	126.36	117.94	76.90	321.20
Masa redistribuida (g)	195.16	49.14	76.90	321.20

En la tabla anterior se recogen todos los valores de volúmenes y masas mencionados anteriormente para la preforma en crudo y para el molde, en cada una de las tres zonas.

5.1.4 DIMENSIONES DEL MOLDE.

Por último, se procede a dimensionar el molde. Tal y como se ha comentado en la metodología, los diámetros y las alturas del molde van a ser los mismos de la preforma en crudo, a excepción de las alturas para las secciones 1 y 3. Para calcular estas alturas se parte de la masa de PTFE en polvo de cada sección, se divide por su densidad aparente (0.9 g/cm^3) y se divide por la sección circular, tal y como se muestra en la **Tabla 3**. Por último, en la **Figura 24** se representan las alturas calculadas más un pequeño aumento de altura en la zona 3 para encajar el pistón inferior y redondear la altura total del molde a 200 mm.

Tabla 3. Valores de alturas para las zonas 1 y 3 del molde calculadas según metodología

	Masa (g)	Volumen (cm ³)	Sección (cm ²)	Altura (cm)
Zona 1	195.16	216.84	15.11	143.5
Zona 3	76.9	85.44	30.39	28.1

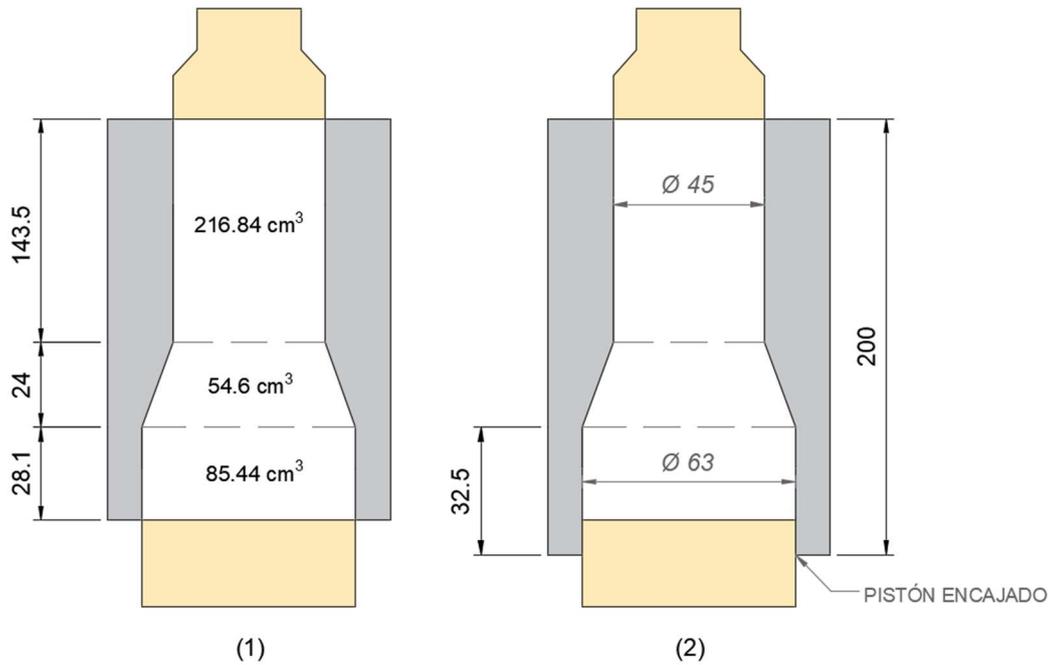


Figura 24. Volúmenes y dimensiones del molde, en milímetros.

Estos datos son los necesarios para poder fabricar el molde y solo queda redondear las esquinas de la zona central con un radio de 20 mm (la diferencia de volumen que estos radios generará en el interior del molde se va a considerar despreciable). Todo ello se recoge en el *Plano 2, Dimensiones del molde*, en el apartado de *Planos*.

5.1.5 PROCESO DE MOLDEO

Para poder llevar a cabo el proceso de moldeo por compresión hace falta el molde y los seis elementos que se muestran en la **Figura 25**.

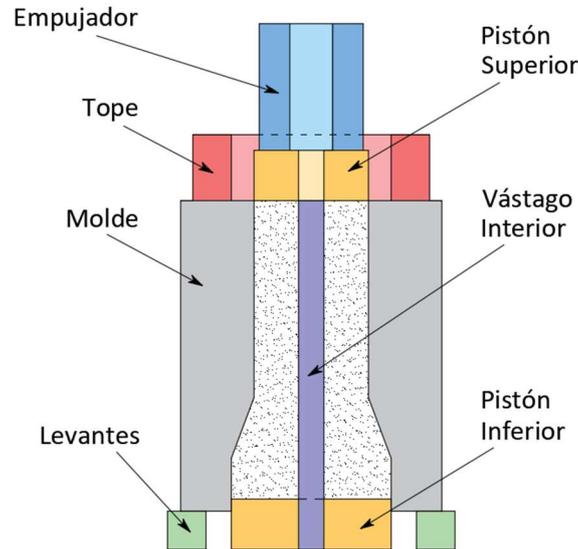


Figura 25. Esquema en sección del montaje completo para el moldeo por compresión.

Tras analizar la forma de la pieza, y fruto de la experiencia en moldeo se fijan las siguientes condiciones:

El **molde** se va a fabricar a partir de un cilindro de hierro con las dimensiones calculadas anteriormente, con la superficie interior pulida para que el PTFE no se adhiera durante el prensado. Además, debe tener unos chaflanes en la entrada superior e inferior para facilitar la colocación de los pistones, así como las esquinas interiores redondeadas para evitar cizallamientos del material durante el prensado.

Los **pistones** tendrán unos diámetros que deben ser ligeramente más pequeños que los diámetros del molde para poder moverse fluidamente en su interior, con unas décimas de milímetro es suficiente. Además, esta pequeña diferencia de diámetro permitirá la salida del aire durante el prensado. También deben tener un agujero para encajar el vástago interior, siendo éste ligeramente mayor al diámetro del vástago. Por último, tendrán un pequeño chaflan en las caras para poder introducirlos con facilidad en el molde, y unas ranuras en los lados para ayudar a la salida del aire. Se van a fabricar en bronce, deben ser de un material más blando para evitar que se puedan quedar atascados en el interior del recorrido y gripen el molde.

El **vástago interior** tendrá un diámetro de 10 mm y una longitud igual a la altura del molde y de los levantes juntos, tal y como se muestra en la **Figura 27**. También se va a fabricar en hierro y deberá tener su superficie pulida, como el molde.

Se van a utilizar tres **levantes** para que aguanten el peso del molde equitativamente. Van a ser cilindros de hierro con una altura ligeramente menor al pistón inferior, para que éste pueda quedarse encajado dentro del molde.

El **empujador** va a ser un tubo de hierro con el diámetro exterior ligeramente inferior al diámetro del pistón superior y con el diámetro interior mayor al diámetro del vástago, para que no entre en contacto con nada más que el pistón superior y la prensa.

El **tope** va a ser un anillo de hierro con los diámetros exactos para no entrar en contacto con nada más que el molde y la prensa. Su altura será la exacta para que el pistón superior no baje demasiado y la preforma adquiera las dimensiones calculadas en la sección 1. Por último, su diámetro interior será ligeramente superior al diámetro exterior del pistón inferior, para poder emplearse en el desmoldeo de la preforma.

5.1.5 RECORRIDO DE PRENSADO Y CÁLCULO DE LAS PRESIONES DE TRABAJO DEL PROCESO DE MOLDEO.

Tal y como se muestra en la **Figura 26**, con las dimensiones del molde y con las dimensiones de la preforma en crudo el recorrido del pistón superior no puede exceder los 104.8 milímetros.

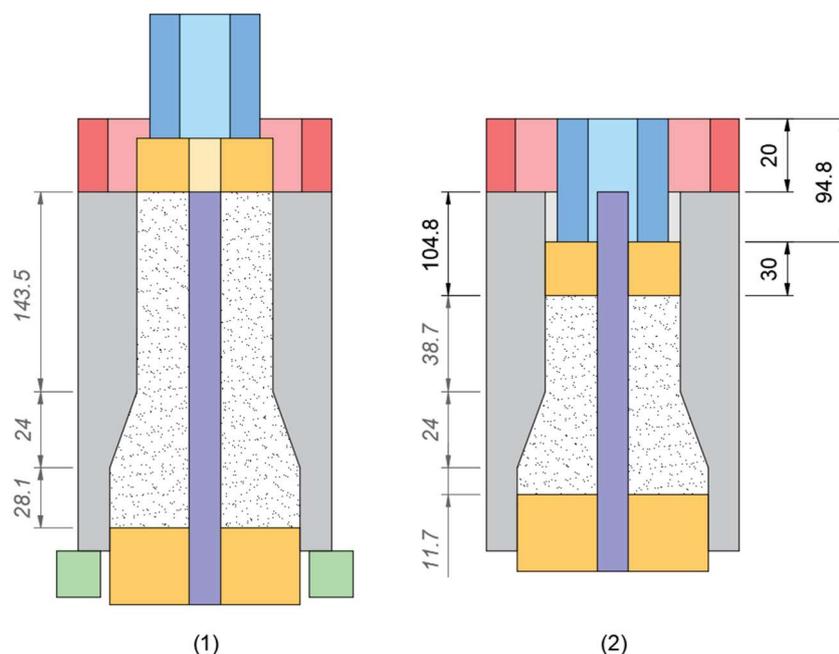


Figura 26. Recorrido y dimensiones antes y después del prensado, en milímetros.

Para asegurar las dimensiones del recorrido se emplea el pistón superior, el empujador y el tope. El tope tendrá una altura de 20 mm y el pistón superior tendrá una altura de 30 mm y el empujador tendrá una altura de 94.8 mm. Las demás dimensiones de los elementos del montaje se encuentran en el apartado de *Planos*.

El recorrido del pistón inferior vendrá dado por las presiones de trabajo, ya que actúa en el segundo prensado. El cálculo de estas presiones se recoge en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Presiones de trabajo para las superficies de la preforma virgen.

	Superficie (cm ²)	Presión (kg/cm ²)	Tnf
Pistón Superior	15.12	320	4.84
Pistón Inferior	30.39	320	9.73

Una vez prensado, se procede a realizar el sinterizado utilizando la misma curva de temperaturas indicada en la Figura 4.

5.2. RESULTADOS DE LA OBTENCIÓN DE LA PREFORMA BICOMPONENTE.

5.2.1. CÁLCULO DE MASAS POR CAPA.

Siguiendo con la nomenclatura de la **Figura 16** se han calculado las alturas, los volúmenes y las masas para las distintas capas de las preformas. En la **Tabla 5** se recogen todos los valores, teniendo en cuenta que '*Bicomponente 1*' corresponde a la preforma con solo dos capas y '*Bicomponente 2*' corresponde a la preforma con tres capas.

Tabla 5. Alturas, volúmenes y masas para las preformas bicomponente.

h (mm)	V (cm ³)	M (g)	<i>Bicomponente 1</i>		
			h ₁ (mm)	V ₁ (cm ³)	m ₁ (g)
7.83	107.88	233	27	40.82	91.44
<i>Bicomponente 2</i>					
h ₂ (mm)	h ₃ (mm)	V ₂ (cm ³)	V ₃ (cm ³)	m ₂ (g)	m ₃ (g)
12	15	18.14	22.68	40.64	48.96

La altura 'h' corresponde a la altura a la que se quiere el bicomponente en la pieza final. De esa dimensión se obtiene la altura 'h₁' teniendo en cuenta la zona de agarre y el sobredimensionado de la preforma. Lo mismo ocurre para 'h₂' y 'h₃'. Los volúmenes se calculan a partir de las dimensiones de la preforma y las alturas correspondientes, es decir, 'v₁', 'v₂' y 'v₃' se calculan a partir de las alturas 'h₁', 'h₂' y 'h₃' respectivamente y 'V' se obtiene de la diferencia del Volumen total de la preforma y 'v₁'.

La masa 'M' y 'm₃' se han calculado con la densidad final del PTFE, de 2.16 g/cm³, y las masas 'm₁' y 'm₂' se han calculado con la densidad del PTFE con 25% de fibra de vidrio, de 2.24 g/cm³.

Por tanto, a la hora de hacer la primera preforma bicomponente, con dos capas, se añadirá una masa de 233 g de PTFE virgen y luego se añadirán 91.44 g de PTFE con la fibra de vidrio. Para el caso de la preforma con tres capas, primero se añadirá una capa de PTFE virgen de 233 g, luego se añadirán 40.64 g para la capa de PTFE con fibra de vidrio y por último se añadirán 50.8 g de PTFE virgen.

5.2.2. CÁLCULO DE LAS PRESIONES DE TRABAJO.

Las presiones de trabajo necesarias para moldear las preformas bicomponente son las mismas tanto para la opción de dos capas como para la opción de tres capas. Dichas presiones son las representadas en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Presiones de trabajo para las preformas bicomponente.

	Superficie (cm ²)	Presión (kg/cm ²)	Tnf
Pistón Superior	15.12	400	6.05
Pistón Inferior	30.39	400	12.15

5.2.3. CONDICIONES DEL PROCESO DE MOLDEO Y DESMOLDEO

A) MOLDEO

Durante el proceso de moldeo se va a tratar de igualar las presiones de las superficies superior e inferior, dejando libres los dos pistones. Además, se va a controlar que el recorrido de prensado sea el correcto para que la preforma obtenga las dimensiones esperadas.

Para que el proceso sea óptimo, y la preforma en crudo salga con sus medidas, el procedimiento debe ser el representado en la **Figura 27**:

1. Se colocan todos los elementos del montaje en el banco de trabajo de la prensa hidráulica.
2. Se aplica presión solo en la parte superior.
3. Se deja de aplicar presión para quitar los levantes y liberar el pistón inferior.
4. Se aplica de nuevo presión para que los pistones igualen las fuerzas y se comprima equitativamente por arriba y por abajo.

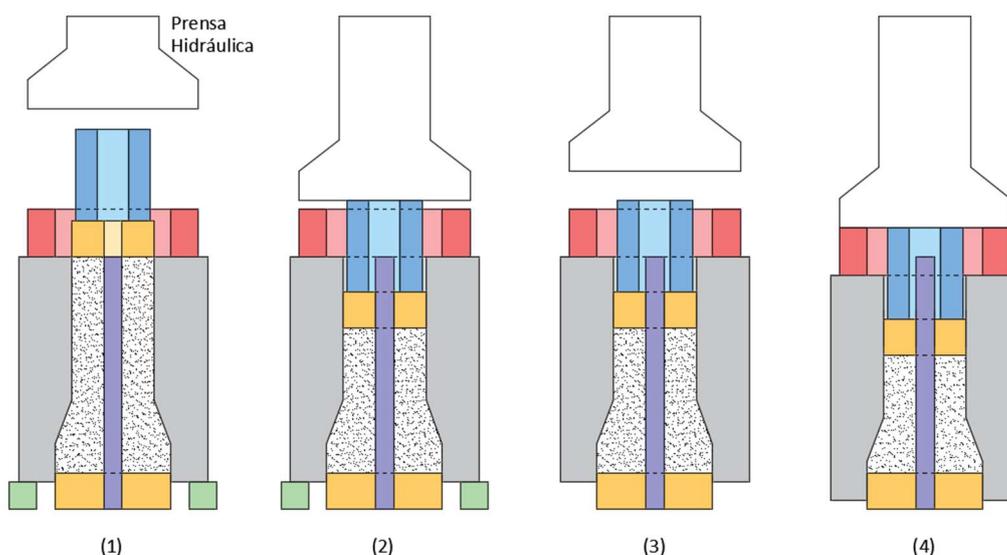


Figura 27. Representación del proceso de moldeo optimizado con todos los elementos.

En el primer paso, el orden de colocación de los elementos sobre el banco de trabajo es muy importante. En primer lugar, se colocan los levantes, el pistón inferior y el vástago interior. En segundo lugar, se coloca el molde sobre los levantes, encajando el pistón inferior en su interior. En tercer lugar, se introduce el polvo de PTFE hasta enrasarlo con el molde. Por último, se coloca el pistón superior, el empujador y el tope.

En el segundo paso, se aplica aproximadamente un 90% de las toneladas del pistón superior. De esta forma, se habrá comprimido ligeramente la parte superior y la prensa quedará cerca del tope, pero sin llegar a tocarlo. Este paso permite que el material ejerza presión sobre las paredes del molde y se puedan quitar los levantes en la siguiente etapa.

En el tercer paso, se aplican las toneladas calculadas para el pistón inferior. En ésta última etapa ambos pistones están libres, por lo que transmitirán la presión por igual. Llegará un punto en el que la prensa hidráulica entrará en contacto con el tope de arriba, impidiendo que se preñe más de la cuenta con el pistón superior, manteniendo así las dimensiones de la preforma.

El proceso es manual y deberá estar controlado todo el tiempo por un operario, ya que la presión decaerá por la salida de aire del interior del molde. El operario deberá mantener la presión estable aumentándola cuando decaiga. Tras un tiempo, el proceso se estabilizará y se podrá extraer la preforma del molde.

B) DESMOLDEO

Para facilitar la extracción de la preforma se utilizará el empujador, el tope y la prensa hidráulica, tal y como se muestra en la **Figura 28**.

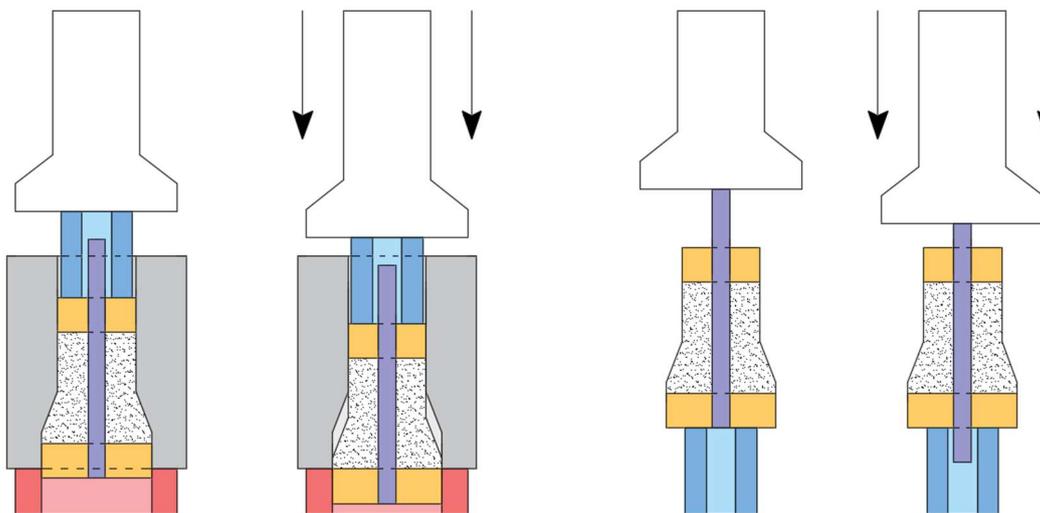


Figura 28. Representación del proceso de extracción de la preforma.

En primer lugar, se coloca el tope en la parte inferior y se ejercerá presión ligeramente sobre el empujador, y así la preforma se despegará de las paredes del molde. De forma análoga se colocará el empujador bajo la preforma para extraer el pistón. Solo con mover los elementos ligeramente se desprenderán de las paredes y se podrá extraer manualmente.

5.3. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES.

Tras seguir la metodología del proceso se ha fabricado el molde, junto con el resto de elementos del montaje, y se han obtenido las preformas, tanto las vírgenes como las bicomponente. A continuación, se muestran los resultados de las pruebas: dimensiones reales, tiempos de prensado y tiempos de mecanizado de los distintos casos.

5.3.1 PROCESO DE OBTENCIÓN DE LA PREFORMA VIRGEN.

En la **Figura 29** se muestra la preforma virgen ya prensada y sinterizada, lista para el mecanizado, junto con la pieza final a su lado.



Figura 29. Imagen de la pieza terminada y la preforma sinterizada.

Se han obtenido y medido tres preformas, sus dimensiones se muestran en la siguiente tabla, donde 'h_{base}', corresponde a la altura de la base de la preforma. Las mediciones se han hecho con un pie de rey tratando de ser lo más preciso posible, ya que las esquinas están redondeadas y es difícil medir la altura de la base con exactitud.

Tabla 7. Medidas reales de las tres preformas sinterizadas.

	h _{Base}	h _{Total}	Ø Superior	Ø Inferior	Ø Interior	
Preforma 1	10.00	75.27	43.71	61.59	9.80	mm
Preforma 2	10.50	74.53	43.70	61.51	9.82	mm
Preforma 3	10.40	75.00	43.70	61.49	9.79	mm
Media	10.30	74.93	43.70	61.53	9.80	mm

Las preformas de PTFE virgen obtenidas con el proceso optimizado se ajustan a los datos calculados. Las contracciones y dilataciones han sido menores al 3%, ya que era el caso más desfavorable. Los diámetros son bastante estables, variando solo por una o dos centésimas de milímetro. Cabe destacar que, se esperaba un aumento de los diámetros interiores, pero estos se han reducido entre una y dos décimas de milímetro. Por otro lado, las alturas totales varían

bastante entre ellas, esta fluctuación era de esperar y por ello se aumentó el margen de espesor durante el proceso de diseño, para que hubiese suficiente material a pesar de las variaciones.

Las preformas no presentan deformaciones de ningún tipo tras el sinterizado, solo se aprecian las contracciones y dilataciones propias del proceso.

A pesar de las pequeñas diferencias con respecto a los datos calculados, las dimensiones de la preforma son las adecuadas para poder trabajar con ellas. En el caso de las alturas no se ve conveniente aplicar una modificación, sin embargo, los diámetros son tan estables que se podría modificar el vástago interior con un diámetro de 12 mm para reducir más material. A pesar de que, cambiando el vástago interior se reduzca material, habría que cambiar los pistones para poder utilizar el nuevo vástago. Esta reducción de material va a ser despreciable en comparación con tener que cambiar los pistones.

El tiempo de prensado en crudo ronda los 6 minutos por pieza, teniendo en cuenta el llenado del molde, el prensado, el tiempo de estabilizado de la presión, debido a la salida del aire, y el desmoldeo. El proceso se realiza por un operario de forma manual, por lo que los tiempos no son exactos y van variando ligeramente.

Por último, el tiempo del ciclo de mecanizado, para obtener la pieza final, ha sido de 5 minutos y 22 segundos. Este tiempo corresponde solo al proceso que realiza la propia máquina.

En conclusión, la preforma está optimizada por completo, pero, en caso de fabricar un nuevo molde, o en caso de cambiar los pistones, se aconseja modificar el vástago interior a 12 milímetros.

5.3.2 PROCESO DE OBTENCIÓN DE LAS PREFORMAS BICOMPONENTE.

En la **Figura 30** se muestra las preformas bicomponente, ya prensada y sinterizada, listas para el mecanizado. Son piezas obtenidas con fibra de vidrio en 25% en peso, además de un aditivo azul para dar color y poder observar visualmente el cambio.



Figura 30. Imagen de las preformas bicomponente sinterizadas.

Se han obtenido y medido dos preformas bicomponente de dos capas y otras dos de tres capas. Las dimensiones se muestran en la siguiente tabla, donde las mediciones de las alturas ' h_1 ', ' h_2 ' y ' h_3 ' corresponden a la metodología según la **Figura 16**.

Tabla 8. Medidas reales de las preformas bicomponente sinterizadas de dos capas.

Dos capas	h1 (mm)	hTotal (mm)	Ø Superior (mm)	Ø Inferior (mm)	Ø Interior (mm)
Preforma 1	25.76	75.14	43.9	61.57	9.9
Preforma 2	25.59	75.05	43.78	61.74	9.82
Media	25.68	75.10	43.84	61.66	9.86

Tabla 9. Medidas reales de las preformas bicomponente sinterizadas de tres capas.

Tres capas	h2 (mm)	h3 (mm)	hTotal (mm)	Ø Superior (mm)	Ø Inferior (mm)	Ø Interior (mm)
Preforma 1	11.55	15.5	75.05	43.6	61.52	9.91
Preforma 2	11.79	15.36	75	43.8	61.61	9.8
Media	11.67	15.43	75.03	43.70	61.57	9.86

Producir varias capas aumenta considerablemente el tiempo de prensado. Aproximadamente se incrementa un minuto por cada capa que se añade. La finalidad de la preforma de tres capas era tratar de reducir la masa de PTFE con fibra de vidrio para reducir costes, pero añadir una tercera capa aumenta el tiempo de producción tanto que la reducción de coste se hace despreciable. Es más eficiente producir las piezas con solo dos capas y desechar material cargado, aunque tenga un ligero coste superior al virgen.

Por otro lado, las dimensiones de la preforma cargada están dentro de lo esperado, al igual que con las preformas vírgenes. Los diámetros interiores se reducen ligeramente por lo que sería conveniente utilizar un vástago interior de 12 mm. Sin embargo, las alturas totales parecen ser más estables. Esto es debido a que las preformas bicomponente se han fabricado pesando las masas exactas y las preformas vírgenes se han producido con el volumen del molde. Al no pesar las masas la variación es ligeramente superior, pero no supone un gran problema y el trabajador no pierde tiempo con el pesado del material.

Tras mecanizar la pieza con la preforma bicomponente observamos que la zona de cambio entre la parte cargada y la parte virgen no es muy precisa, ya que se ven las diferencias de grano entre las distintas partes y no se forma una línea horizontal exacta. No se puede asegurar la zona de cambio en un punto concreto de la preforma, sin embargo, se puede delimitar una zona de cambio, con unos límites superior e inferior, de forma que se puedan producir una gran cantidad de piezas estables, ajustándose a los límites.

El tiempo de prensado ronda los 7 minutos para las preformas de dos capas y 8 minutos para las preformas de tres capas, tener que pesar las masas de las distintas capas e igualarlas en el molde incrementa el tiempo de obtención. El proceso se realiza por un operario de forma manual, por lo que los tiempos no son exactos y van variando ligeramente.

Por último, el tiempo del ciclo de mecanizado, para obtener la pieza final, ha sido también de 5 minutos y 22 segundos. El hecho de haber añadido un aditivo en una zona de la preforma no varía el tiempo de mecanizado, es el volumen y la figura de la preforma la que hace que este tiempo aumente o disminuya.

5.3.3. OBSERVACIONES GENERALES DEL PROCESO DE MOLDEO Y MECANIZADO PARA LOS TRES TIPOS DE PREFORMA PRODUCIDOS.

Las principales observaciones durante el proceso de moldeo y mecanizado de las piezas son las siguientes:

-Se genera una rebaba no deseada. Esto es debido a que el material se cuele por las holguras del molde tal y como se muestra en la **Figura 31**. La holgura viene dada por los pistones, para que puedan moverse con fluidez y para ayudar a la salida del aire.

Esta rebaba no supone un gran problema, simplemente se retira manualmente con cuidado de no dañar la preforma en crudo.



Figura 31. Imagen de la rebaba generada tras el prensado.

-Desgaste prematuro de las herramientas de mecanizado.

Durante el proceso de mecanizado de las preformas bicomponente se ha detectado que las herramientas se desgastan más rápidamente. La fibra de vidrio añadida a la pieza tiene partículas duras y abrasivas que actúan de lija sobre las puntas de las herramientas, lo cual supone un problema ya que estas herramientas deberán ser afiladas o cambiadas con una mayor frecuencia.

-Por otra parte, en la **Figura 32** se muestra la zona de cambio entre la parte cargada y la parte virgen de la pieza bicomponente. En la imagen se puede apreciar como la franja de cambio es irregular, pero se ajusta a una zona en concreto. Por tanto, se puede definir unos límites superior e inferior y poder mover la zona de cambio hacia arriba o hacia abajo variando las masas de cada zona.



Figura 32. Imagen del cambio en la pieza bicomponente.

5.3.4. COMPARACIÓN DE LOS PROCESOS DE MOLDEO Y MECANIZADO ORIGINAL Y DE ESTE PROYECTO.

MASA

En un molde genérico con un diámetro de 63 mm, la preforma original requería una masa de 505 g. Con el molde de la preforma calculado se utilizan 320 g por cada pieza. Esta reducción de 185 g supone una gran disminución de material desperdiciado. La producción promedio de estas piezas es de 6.000 unidades por año en la empresa, lo que supone una reducción de 1080 kg de material anualmente, es decir, se utiliza un 36% menos de material.

Por tanto, podemos asegurar que hay un ahorro de material suficiente para justificar el desarrollo de un molde a medida para esta pieza.

TIEMPOS DE MOLDEO

Por otra parte, los tiempos de moldeo no se han visto afectados, prácticamente se tarda lo mismo en prensar el molde optimizado que en prensar el molde genérico. Estos tiempos rondan los 6 minutos por pieza, considerando: pesar el polvo, llenar el molde, prensar y desmoldear. No es un tiempo exacto ya que se hace manualmente y va variando, pero no difiere de los 6 minutos por pieza.

TIEMPOS DE MECANIZADO

Al obtener la preforma con el hueco interior se ha eliminado la etapa de vaciado interior, además, la etapa de vaciado exterior se ha reducido ya que no hay tanto material que desbastar. En resumen, la etapa antes de la optimización se encontraba en 7 minutos 57 segundos y ahora solo se tardan 5 minutos y 22 segundos. Teniendo en cuenta las 6000 unidades anuales, esta mejoría se traduce en una reducción del tiempo de proceso anual de 258h de trabajo, es decir una reducción del 32.5% del tiempo de producción.

6. CONCLUSIONES

6.1. PREFORMA VIRGEN.

Las preformas de PTFE virgen se han obtenido con éxito, se ajustan a los datos de diseño y son funcionales para poder mecanizar la pieza final en un CNC.

Las contracciones y dilataciones de los diámetros exteriores se han mantenido estables. Se podría tratar de reducir aún más los diámetros, pero habría muy poco margen de error y se corre el riesgo de que la preforma deje de ser funcional.

Las alturas, a pesar de variar bastante, están también muy ajustadas y no se requiere modificar nada del proceso para mejorar su optimización.

Por último, el diámetro interior de la preforma es muy estable. Por tanto, sí sería aconsejable modificar el vástago interior para ajustar más el diámetro de la preforma al diámetro de la pieza final, pudiendo reducirse hasta 2mm aproximadamente.

6.2. PREFORMAS BICOMPONENTE.

Con respecto a las preformas bicomponente, también se han obtenido con éxito y según los datos de diseño. Las dimensiones son suficientes para poder mecanizar la pieza final, por lo que las preformas son funcionales.

En cuanto a las dimensiones cabe destacar lo mismo que para la preforma virgen, los diámetros y alturas están muy ajustados y solo cabría reducir ligeramente el diámetro interior para poder desperdiciar menor masa de material.

Por último, la diferencia entre dos y tres capas es considerable. Fabricar dos capas es mucho más sencillo que fabricar tres, y la reducción de costes de material entre ambas es despreciable, a pesar de que el PTFE con fibra de vidrio sea más caro. Por tanto, se desecha la opción de tres capas y se recomienda la opción de dos capas.

6.3. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO.

Gracias a la optimización se desecha un 36.6 % menos de material y se invierte un 32.5% menos tiempo de fabricación. El material no desechado se podrá emplear en la fabricación de más piezas y el tiempo ganado se podrá emplear en producir otros pedidos.

Por último, cabe destacar que el tiempo de prensado de la preforma pasa a ser la etapa determinante del proceso, ya que es la que más tiempo necesita. Sabiendo que las dimensiones del molde son adecuadas, y tras ver que los resultados son óptimos, se recomienda el diseño y fabricación de un nuevo molde para prensar varias preformas a la vez, de esta forma el tiempo de moldeo será prácticamente el mismo, pero se aumentará la tasa de producción.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Andena, L., Rink, M. & Polastri, F. (2004). Simulation of PTFE sintering: Thermal stresses and deformation behavior. *Polymer Engineering and Science*, 44(7), 1368–1378. doi:10.1002/pen.20132
- Blair, J. A. (1971). *Fluorocarbons, Polymers*. Re printed from *Encyclopedia of Industrial Chemical Analysis* Vol. 13, 73-93.
- Data information of PTFE* (n.d.). Obtenido el 1 de Noviembre del 2021, desde <https://oec.world/en/profile/hs/polytetrafluoroethylene>
- Dhanumalayan, E., & Joshi, G. M. (2018). Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE)—a review. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 1(2), 247–268. doi:10.1007/s42114-018-0023-8
- Du Pont de Nemours International S.A. *Filled Compounds of Teflon PTFE*. (1988).
- Fundamentos de los Procesos de Mecanizado*. (n.d.). Obtenido el 21 de Abril del 2021, desde <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn38.html>
- Howard, H. U., Dutour, J. Y., & van der Sanden, J. A. (1974). *Teflon Massive Billet Molding*. Du Pont de Nemours International S. A.
- AGC Chemicals Europe. *The extrusion of PTFE granular powders. Technical Service Note F2* (2001). Amsterdam.

PRESUPUESTO

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.	1
2. PRESUPUESTO.	2
2.1. FABRICACIÓN DEL MOLDE Y DEMÁS ELEMENTOS DEL MONTAJE.	2
2.2. MOLDEO Y SINTERIZADO DE LAS PREFORMAS.	3
2.3. MECANIZADO DE LAS PIEZAS.	4
3. RESUMEN DEL PRESUPUESTO.	5

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coste de materiales y mano de obra para la fabricación del molde y elementos del montaje	2
Tabla 2. Coste de materiales y mano de obra para obtener las preformas por moldeo y sinterizado.	3
Tabla 3. Coste de mano de obra para mecanizar las piezas finales en el CNC.	4
Tabla 4. Resumen total del presupuesto.	5

1. INTRODUCCIÓN

El siguiente documento trata de cuantificar el coste total de la elaboración del estudio, incluyendo un margen de beneficios. El presupuesto se ha dividido por orden en las diferentes etapas del proceso, empezando por la fabricación del molde, luego la etapa del prensado y sinterizado y por último la etapa de mecanizado de la pieza final.

Principalmente el estudio se centra en el coste de los materiales y en la mano de obra. El coste de los equipos se considera despreciable teniendo en cuenta que el tiempo invertido del uso de los equipos para los ensayos son horas y los equipos se amortizan en años.

Los precios utilizados están extraídos de catálogos y facilitados por la empresa a fecha del 2021.

2. PRESUPUESTO

2.1. FABRICACIÓN DEL MOLDE Y DEMÁS ELEMENTOS DEL MONTAJE.

En la **tabla 1** se muestra el presupuesto desglosado para la fabricación del molde y el resto de elementos: pistones, levantes, empujador, tope y vástago interior. Todos ellos se fabrican a partir de tubos, barras y cilindros de hierro y bronce. Tal y como se ha descrito en la metodología y según las dimensiones de los planos de fabricación.

Tabla 1. Coste de materiales y mano de obra para la fabricación del molde y elementos del montaje.

2.1.1 Materia Prima

Nº	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
2.1.1.1	Ud	Cilindro de hierro macizo de 100 mm de diámetro y 210 mm de alto <i>(Para el mecanizado del molde).</i>	1	62.46 €	62.46 €
2.1.1.2	Ud	Cilindro de bronce macizo de 65 mm de diámetro y 80 mm de alto <i>(Para el mecanizado de los pistones).</i>	1	38.56 €	38.56 €
2.1.1.3	Ud	Barra de hierro de 20 mm de diámetro y 100 mm de alto <i>(Para el mecanizado de los tres levantes).</i>	1	16.44 €	16.44 €
2.1.1.4	Ud	Barra de hierro pulido de 10 mm de diámetro y 250 mm de alto <i>(Para el mecanizado del vástago interior).</i>	1	27.12 €	27.12 €
2.1.1.5	Ud	Barra de hierro de 40 mm de diámetro y 100 mm de alto <i>(Para el mecanizado del empujador).</i>	1	12.50 €	12.50 €
2.1.1.6	Ud	Tubo de hierro de 100 mm de diámetro, 20 mm de espesor y 50 mm de alto <i>(Para el mecanizado del tope).</i>	1	22.30 €	22.30 €
Total 1.1 Materia Prima:					179.38 €

Nº	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
2.1.2 Mecanizado					
2.1.2.1	h	Preparación y montaje de las herramientas para el mecanizado de metales en el CNC por operario.	1.2	25.00 €	30.00 €
2.1.2.2	h	Mecanizado de metales, con lubricación y comprobación in situ de medidas por operario.	5.3	25.00 €	132.50 €
Total 1.2 Mecanizado:					162.50 €

Parcial Nº 1. Fabricación del molde y demás elementos del montaje: 341.88 €

2.2. MOLDEO Y SINTERIZADO DE LAS PREFORMAS.

En la **tabla 2** se muestra el presupuesto desglosado para la etapa de moldeo y sinterizado de las preformas, tanto las vírgenes como las bicomponente.

Tabla 2. Coste de materiales y mano de obra para obtener las preformas por moldeo y sinterizado.

2.2.1 Materia Prima

N°	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
2.2.1.1	Kg	PTFE en polvo, sin aditivos.	1.48	7	10.36 €
2.2.1.2	Kg	PTFE en polvo, con 25% de fibra de vidrio.	0.23	24	5.52 €
Total 2.1 Materia Prima:					15.88 €

2.2.2 Moldeo

N°	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
2.2.2.1	h	Preparación y montaje del proceso de moldeo por compresión por operario.	0.35	20	7 €
2.2.2.2	h	Proceso de moldeo. Llenado, pesado, enrasado de las distintas capas, estabilizado de la presión y desmoldeo de las preformas en crudo por operario.	0.67	20	13.4 €
Total 2.2 Mecanizado:					20.4 €

2.2.3 Sinterizado

N°	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
2.2.3.1	h	Tratamiento térmico con la estufa para el sinterizado del material.	4	8	32 €
Total 2.3 Mecanizado:					32 €
Parcial N° 2. Fabricación del molde y demás elementos del montaje:					68.28 €

2.3. MECANIZADO DE LAS PIEZAS.

En la **tabla 3** se muestra el presupuesto desglosado para la etapa de mecanizado de las preformas con el fin de obtener las piezas finales acabadas.

Tabla 3. Coste de mano de obra para mecanizar las piezas finales en el CNC.

2.3.1 Mecanizado

Nº	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
2.3.1.1	h	Preparación y montaje de las herramientas para el mecanizado de piezas de PTFE en el CNC por operario.	2	20	40 €
2.3.1.2	h	Mecanizado de piezas de PTFE, con comprobación in situ de medidas por operario.	0.54	20	10.8 €
Total 1.1 Mecanizado:					50.8 €
Parcial Nº 1. Fabricación del molde y demás elementos del montaje:					50.8 €

3. RESUMEN DEL PRESUPUESTO

A continuación, se recoge el coste total del estudio. El Presupuesto de Ejecución Material (PEM) se obtiene sumando los costes de los tres apartados anteriores: fabricación del molde y demás elementos del montaje, moldeo y sinterizado de las preformas y mecanizado de las piezas. El presupuesto de Ejecución por Contrata se obtiene sumando el PEM con los gastos generales (GG) y el beneficio industrial (BI). Por último, el Presupuesto Base de Licitación (PBC) se obtiene sumando el 21% de iva al PEC.

Tabla 4. Resumen total del presupuesto.

Presupuesto Ejecución Material (PEM):	460.96 €
12% Gastos Generales (GG):	55.32 €
6% Beneficio Industrial (BI):	27.66 €
Presupuesto Ejecución Contrata (PEC):	543.93 €
21% IVA:	114.23 €
Presupuesto Base Licitación (PBC):	658.16 €

Por tanto, el presupuesto base de licitación asciende a SEISCIENTOS CINCUENTA Y OCHO EUROS CON DIECISEIS CENTIMOS.

Valencia a 26 de abril de 2023

PLANOS

CONTENIDO

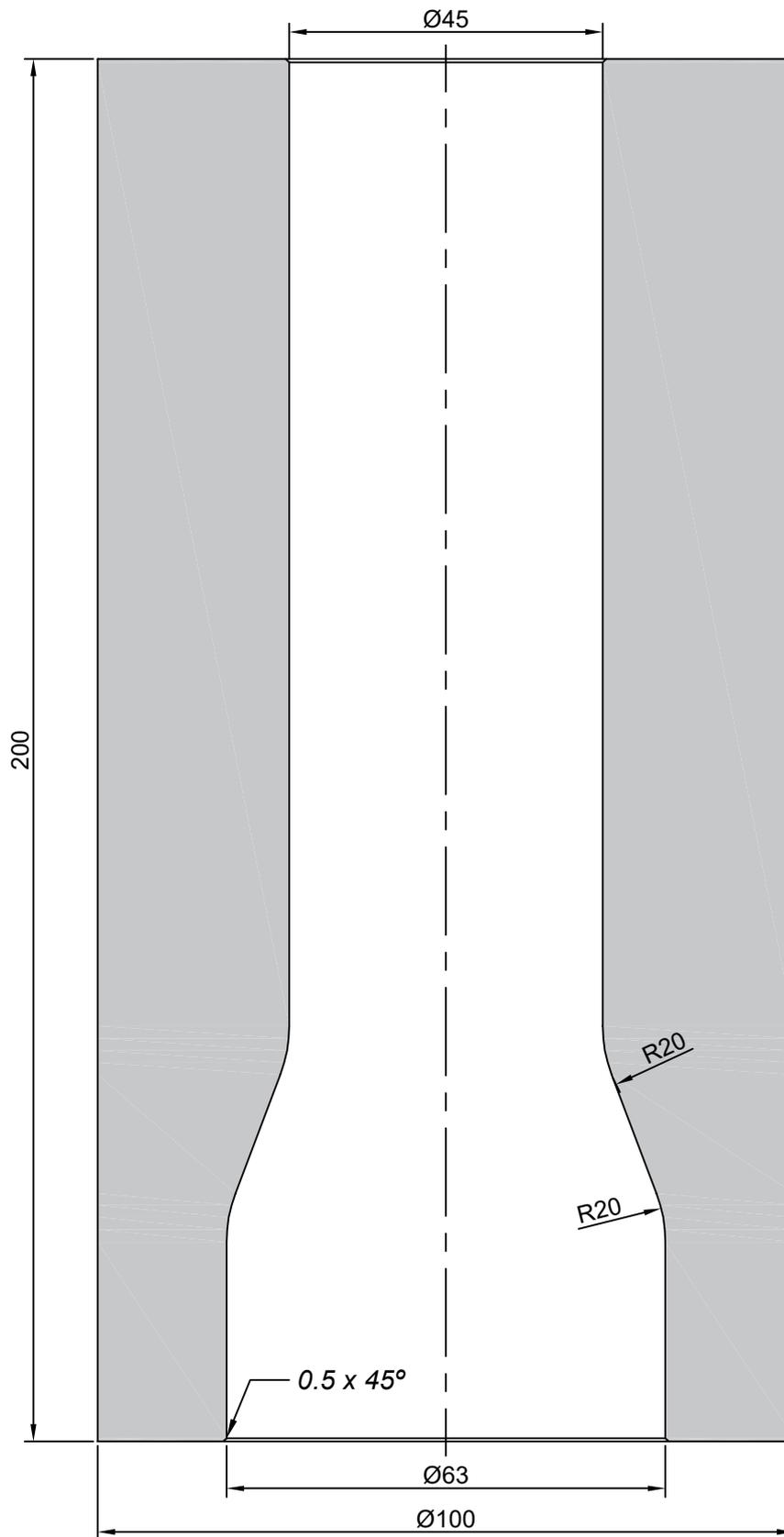
1. INTRODUCCIÓN.	1
2. PLANOS.	2

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1. Dimensiones de la pieza terminada.	2
PLANO 2. Dimensiones del molde.	3
PLANO 3. Pistones.	4
PLANO 4. Tope, empujador, levantes y vástago interio.	5

1. INTRODUCCIÓN

A continuación, se presentan los planos para la fabricación de todos los elementos del moldeo, empezando por el propio molde con las medidas calculadas en el estudio y terminando con los demás accesorios. Además, se adjunta las dimensiones de la pieza final en el **Plano 1** para partir de ella poder obtener las dimensiones de la preforma en el apartado de cálculos.



TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

Proyecto:

ESTUDIO DE MODIFICACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE UNA PIEZA DE PTFE PARA HACERLA BICOMPONENTE Y SU OPTIMIZACIÓN PARA REDUCIR TIEMPOS DE FABRICACIÓN Y MATERIAL DESECHADO.

Fecha:

Mayo 2023

Escala:

1/1

Plano:

Nº Plano:

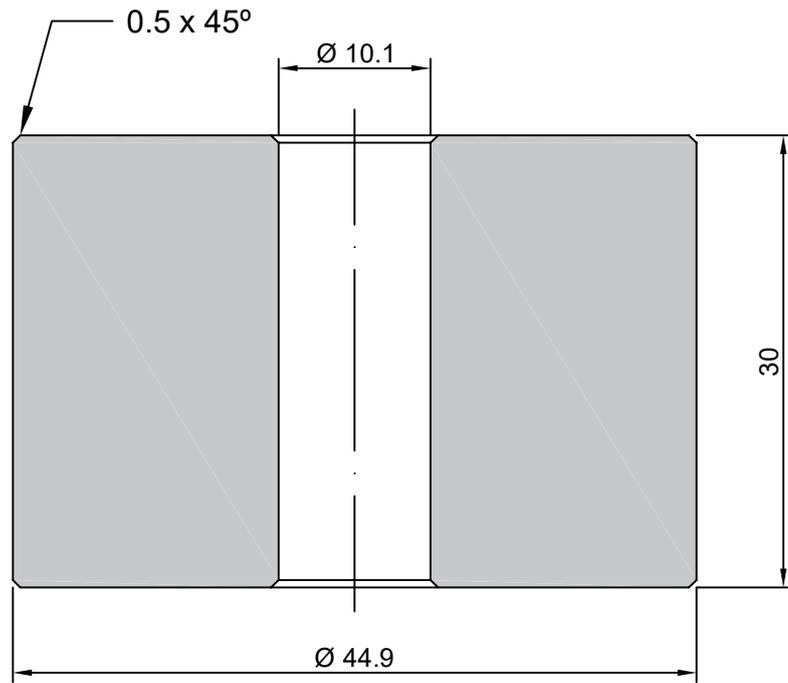
Dimensiones del molde.

Manuel Pastor Navarro

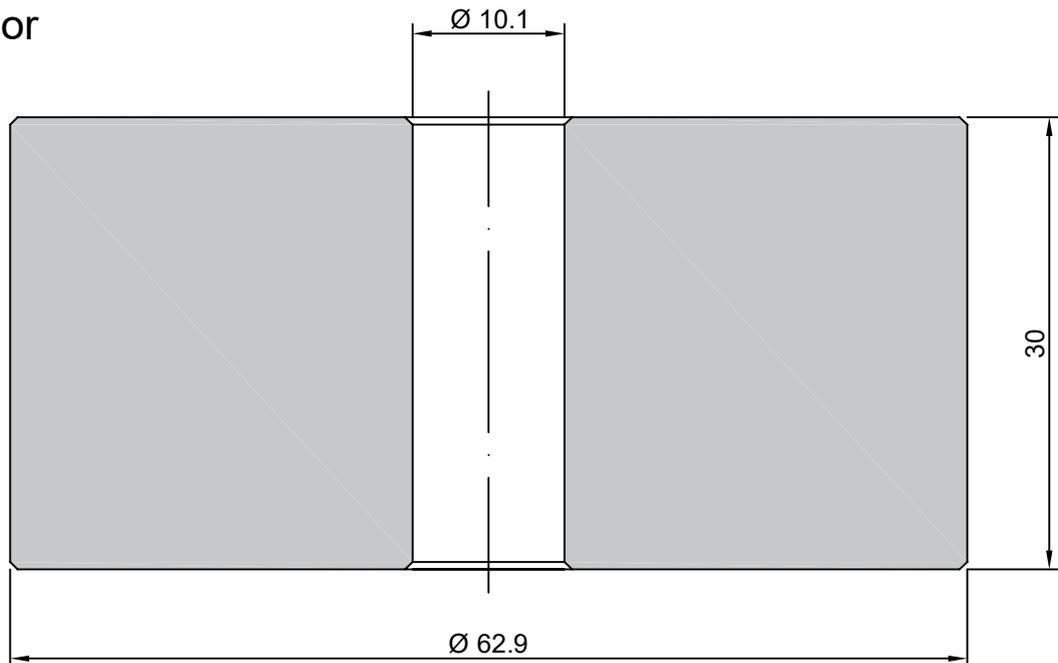
Autor proyecto

2

Pistón Superior



Pistón Inferior



TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

Proyecto:

ESTUDIO DE MODIFICACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE UNA PIEZA DE PTFE PARA HACERLA BICOMPONENTE Y SU OPTIMIZACIÓN PARA REDUCIR TIEMPOS DE FABRICACIÓN Y MATERIAL DESECHADO.

Fecha:

Mayo 2023

Escala:

2/1

Plano:

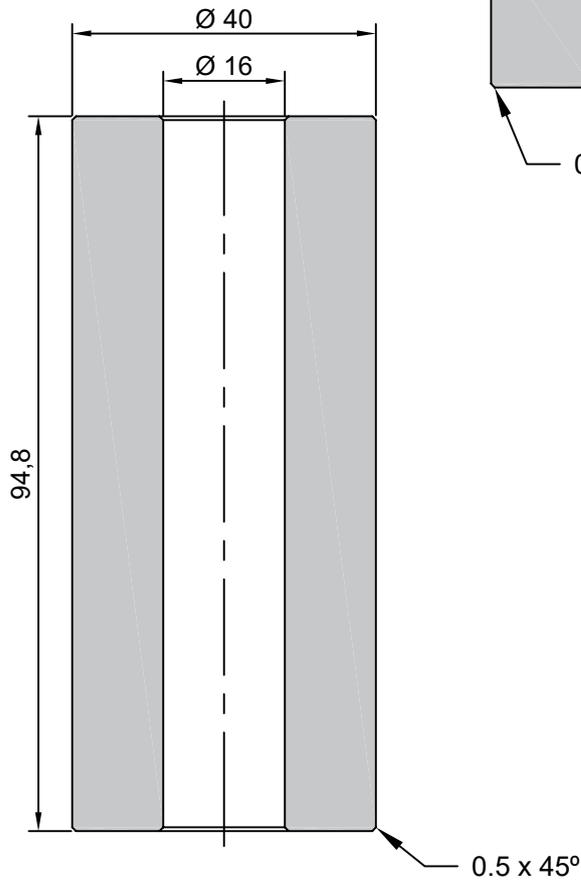
Pistones.

Nº Plano:

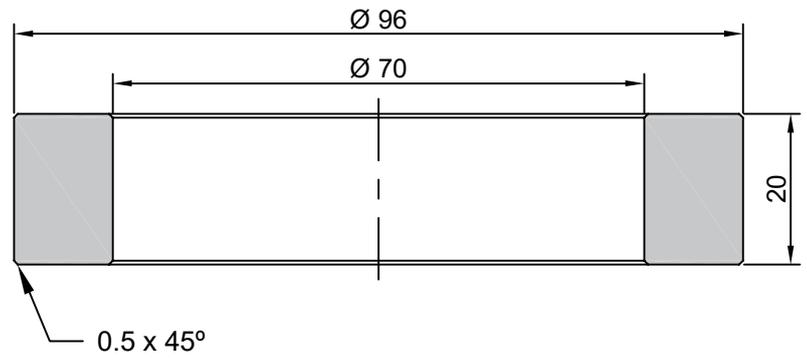
Manuel Pastor Navarro

Autor proyecto

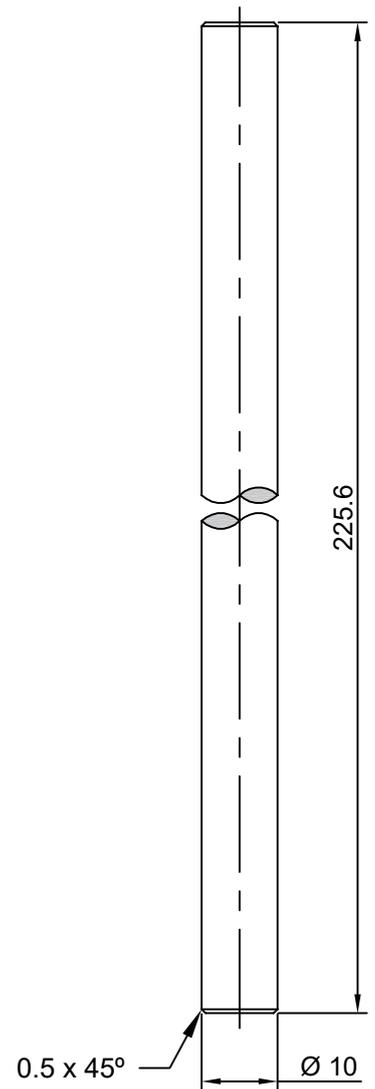
Empujador



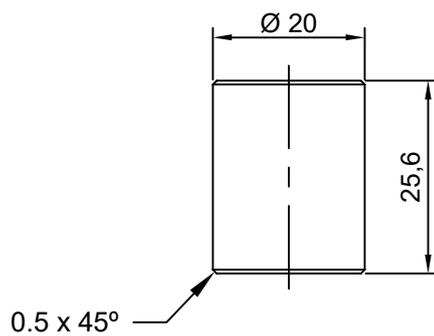
Tope



Vástago interior



Levantes (x3)



TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

Proyecto:

ESTUDIO DE MODIFICACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE UNA PIEZA DE PTFE PARA HACERLA BICOMPONENTE Y SU OPTIMIZACIÓN PARA REDUCIR TIEMPOS DE FABRICACIÓN Y MATERIAL DESECHADO.

Fecha:

Mayo 2023

Escala:

1/1

Plano:

Nº Plano:

Tope, empujador, levantes y vástago interior.

Manuel Pastor Navarro

Autor proyecto