

ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS VARIABLES DE UNA TERMOCONFORMADORA PLÁSTICA DE USO DOMÉSTICO

GABRIEL ANTONIO CAHUEQUE COELLO

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TUTOR: RAFAEL BIENVENIDO BÁRCENA

PUERTO REAL, SEPTIEMBRE 2015

Agradecimientos

Siempre estaré agradecido a mis padres por su dedicación, por abrirme paso hacia el camino correcto en la vida y por los sacrificios a los que se someten por intentar que sea lo mejor de mí. A toda mi familia, tanto la que no se elige, como la que sí por apoyarme y acompañarme en esta travesía que es la vida. A las áreas de Expresión Gráfica y de Procesos de Fabricación por la formación, apoyo y ayuda prestada a lo largo de mi formación como profesional.

A todos, gracias.



ÍNDICE GENERAL



MEMORIA.....	11
1 CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 Objeto.....	13
1.2 Alcance.....	14
1.3 Estructuración del Trabajo Fin de Grado.....	15
2 CAPÍTULO II. ANTECEDENTES.....	16
2.1 Fundamentos del termoconformado plástico.....	16
2.2 Introducción al termoconformado plástico.....	16
2.2.1 Un poco de historia.....	17
2.3 Polímeros termoconformables [4].....	19
2.3.1 Temperatura de transición vítrea.....	20
2.3.2 Polímeros para procesos de termoconformado.....	20
2.3.3 Ventana de termoconformado.....	22
2.3.4 Propiedades mecánicas de polímeros.....	22
2.3.5 Degradación y esperanza de vida de polímeros.....	23
2.4 Termoconformado plástico.....	24
2.4.1 Etapas comunes en el proceso de termoconformado.....	26
2.4.2 Métodos de termoconformado de un solo paso [8].....	28
2.4.3 Métodos de termoconformado de múltiples pasos.....	31
2.4.4 Propiedades de termoplásticos utilizados.....	34
2.5 Diseño de piezas [9].....	37
2.5.1 Parámetros generales que afectan el diseño de piezas.....	37
2.5.2 Aspectos favorables para la rigidez de las piezas.....	41
2.5.3 Algunas pautas para llevar a cabo un correcto diseño.....	42
2.6 Moldes.....	43
2.6.1 Materiales para moldes.....	44
2.6.2 Tipología de molde [11].....	46
2.6.3 Bases de apoyo.....	47
2.6.4 Ventilación en los moldes.....	47
2.6.5 Contracciones y respectiva liberación del molde.....	49
2.6.6 Defectos ocasionados con los moldes.....	50
2.7 Mercado [15].....	57
3 CAPÍTULO III. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	60
3.1 Introducción.....	60
3.2 Equipo utilizado.....	61
3.2.1 Termoconformadora Formech Compac Mini.....	61
3.2.2 Cámara de termografía Fluke TiX560.....	63
3.2.3 Moldes manuales.....	65
3.2.4 Lijadora BOSCH PSS 250 AE.....	66
3.2.5 Moldes en ureol.....	66
3.2.6 Máquina Abrasive Waterjet TCI Cutting BPC 3020.....	67
3.2.7 Máquina CNC EMCO Concept MILL 55.....	68
3.2.8 Máquina de medida por visión TESA VISIO 300GL.....	68
3.3 Materiales.....	69
3.3.1 Materiales termoplásticos utilizados.....	69
3.3.2 Especificaciones de los materiales.....	69

3.4	Estudio térmico de la máquina.....	71
3.4.1	Medición de temperatura.....	71
3.5	Metodología experimental.....	75
3.5.1	Introducción	75
3.5.2	Creación de los moldes.....	75
3.5.3	Realización de los ensayos	87
3.5.4	Estudio cualitativo y cuantitativo de los ensayos.....	102
4	CAPÍTULO IV. RESULTADOS	106
4.1	Introducción	106
4.2	Organización de los resultados obtenidos.....	106
4.3	Resultados de los ensayos con moldes de arcilla	107
4.3.1	Resultados de ensayos con molde en solitario	107
4.3.2	Ensayos con dos moldes simultáneos.....	112
4.3.3	Ensayos de moldes con plataformas	122
4.4	Resultados de los ensayos con moldes de Ureol.....	130
4.4.1	Resultados de ensayos con moldes lubricados.....	130
4.4.2	Resultados de ensayos con moldes no lubricados	141
4.4.3	Resultados de ensayos utilizando PE de 3mm.....	145
4.4.5	Resultados de ensayos con PMMA	149
4.4.6	Resultados de ensayos utilizando HIPS de 1mm	155
5	CAPÍTULO V. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES	161
5.1	Introducción	161
5.2	Discusiones y conclusiones de la variación de espesor lateral producido por termoconformado.....	161
5.2.1	Moldes de arcilla	162
5.2.2	Moldes de ureol	172
5.3	Líneas futuras.....	188
6	BIBLIOGRAFÍA.....	189
7	ANEXOS.....	191
7.1	Anexo I. Tablas y gráficas de los ensayos restantes.	191
A1.1	Ensayos de pruebas con moldes de arcilla.....	191
A1.2	Ensayos de pruebas con molde de ureol.....	199



MEMORIA



1 CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Objeto

El presente Trabajo Fin de Grado trata sobre procesos de termoconformado plástico; especificándose, en concreto, en el estudio del comportamiento, funcionamiento y trabajo de una máquina, *Formech Compac Mini*. Es una máquina de uso doméstico que aplica vacío para llevar a cabo el proceso de termoconformado plástico.

El concepto de termoconformado, que también se conoce como termoformado, es un proceso en el cual una fina lámina, o plancha, de un material termoplástico es calentada a una temperatura constante de manera uniforme en todo su área hasta que dicho material alcanza un punto físico en el que se encuentra reblandecido. Es entonces que es capaz de adquirir la geometría de un molde, con ayuda de una fuerza física externa y una bomba de vacío, y mantenerla permanentemente una vez vuelve a una temperatura inferior a la temperatura que se conoce como *Temperatura de Termoconformado*.

Una máquina termoconformadora de plásticos puede variar en tamaño dependiendo de la función que tenga, se cuenta con una gama muy amplia que engloba máquinas, como en este caso, domésticas hasta máquinas enormes específicas para grandes industrias.

En la actualidad, es el proceso más utilizado en la industria de empaquetado y embalaje en sectores tales como los de; alimentación, cosmética, artículos de electrónica, farmacéutica, etc. Se puede destacar que en sectores industriales más robustos también hay hueco para el termoconformado; desde la fabricación de piezas de vehículos, hasta componentes de larga duración para aeronaves.

Hoy día, los fines que tiene el proceso aumentan debido a que, los procesos de fabricación de muchos productos se encuentran en estado de transición para adoptar el del termoconformado gracias a los bajos costes que supone

para las grandes empresas. Es por esto que resulta de gran interés el estudio y desarrollo de esta tecnología.

Como proceso principal del estudio se realizan una serie de moldes en distintos materiales que se diferencian entre sí por la inclinación de sus paredes laterales y el acabado de los vértices correspondientes a la superficie superior del cuerpo. Éstos son los encargados de producir una pieza final a la que se le realiza un análisis exhaustivo, tanto cualitativo como, posteriormente, cuantitativo.

1.2 Alcance

El alcance de este trabajo comprende la utilización de tres materiales termoplásticos distintos con los que se estudia el comportamiento de la máquina relacionado con:

- Límites de parámetros variables
 - Ángulos de inclinación de paredes que permiten la correcta definición de los moldes
 - Alturas máximas para cada material
 - Profundidad máxima en cavidades
 - Tiempo de exposición necesario de cada material termoplástico a la fuente de calor para llegar al punto óptimo de trabajo

El análisis también incluye una interpretación de los resultados relacionados con los siguientes aspectos:

- Calidad superficial de la pieza final
- Geometría del termoplástico teniendo en cuenta dos tipos de materiales distintos para los moldes
 - Cualquier deformación que pueda originarse
- Liberación del material utilizando lubricante o no
 - Imposibilidad de liberación
 - Liberación causando defectos y/o deformaciones
 - Liberación sin inconvenientes.

1.3 Estructuración del Trabajo Fin de Grado

El presente Trabajo Fin de Grado se divide en tres bloques principales en los que se exponen de manera teórica las indicaciones teóricas, pautas a tener en cuenta y pasos a seguir para realizar correctamente un ensayo de termoconformado por vacío con su correspondiente análisis final.

El primer bloque engloba toda la información teórica que ayudará a llegar a la utilización óptima de la máquina, relacionada con las características de los siguientes puntos, entre otros:

- La propia máquina termoconformadora
- El proceso de termoconformado
- Propiedades de los materiales que se utilizan en el proceso de termoconformado
 - Polímeros termoplásticos
 - Moldes
- Aplicaciones del proceso en la industria

El segundo bloque contiene la metodología que se ha seguido. Viene expuesto cómo ha de realizarse el proceso de termoconformado para llevar a cabo un posterior análisis de los resultados.

Por último, en el tercer bloque del trabajo se exponen los apartados de resultados, discusiones y conclusiones. Estos apartados contienen una clasificación de la evolución de las dimensiones de los termoplásticos tras exponerse al proceso de termoconformado. Dichos resultados se discuten para así obtener conclusiones y líneas futuras.

2 CAPÍTULO II. ANTECEDENTES

2.1 Fundamentos del termoconformado plástico

El acabado de un producto que se fabrica a partir de un proceso de termoconformado es directamente dependiente de una variedad de muchos factores. Entre ellos se encuentran el tipo de material termoplástico empleado, distintos grosores con los que se trabaja, rango de temperaturas, presión de vaciado, material del molde, geometría del molde, posición del molde en la zona de colocación o el tiempo de enfriamiento.

A continuación se encuentra descrita la información relacionada con:

- El propio proceso de termoconformado y los distintos tipos que existen
- Las propiedades de los materiales empleados en el proceso
 - Polímeros
 - Moldes
- Otros procesos con polímeros en la industria

2.2 Introducción al termoconformado plástico

El término conocido como *termoconformado* se refiere a un proceso que comienza a partir de una lámina de un polímero termoplástico. Esto incluye una serie de etapas en las que se expone la lamina a una fuente de calor hasta que adquiere una temperatura que la convierte reblandecida o maleable. Es entonces que la lámina se estira contra un molde frío, puede ser de acceso por una cara o dos. Una vez se enfría la lámina termoplástica hasta el punto en el que es capaz de retener la geometría del molde, se realiza la acción de liberación en la que se separa el molde y se recorta, posteriormente, el exceso de material [1] [2].

El proceso de termoconformado se puede realizar de varias maneras que se clasifican en aquellos que utilizan:

- Compresión
- Soplado (presión positiva)
- Vacío (presión negativa)

Tales como el termoconformado al vacío directo, conformado con macho, conformado por molde coincidente, conformado al vacío con núcleo de ayuda y burbuja de presión, conformado a presión en fase sólida y conformado mecánico.

Por lo general, el proceso de termoconformado se trata de uno de los métodos de procesamiento de polímeros más antiguos. Es un proceso extremadamente versátil que se utiliza para confeccionar y fabricar todo tipo de productos que en el mercado engloban desde embalajes simples para alimentos, hasta paneles de alta resistencia para aeronaves. Existen incontables fines para el proceso los cuales rodean la vida del ser humano a diario.

El termoconformado tiene también un uso importante que es el de elaboración de prototipos que serán posteriormente creados por otros procesos más complejos de manufactura. Esto resulta en el espectacular resultado de un ahorro económico considerablemente notable para las empresas que lo utilizan.

El método tiene varias formas de aplicarse, ya sea para la creación de un producto desechable, tal que aquél destinado para el mercado de alimentos, como puede ser fabricar uno para el mercado aeroespacial; sin embargo, es esencialmente el mismo para todos los casos, solo que a distinta escala.

2.2.1 Un poco de historia

Según fuentes, el termoconformado es considerado uno de los métodos más antiguos para dar forma a piezas plásticas.

En la prehistoria, los antiguos egipcios trabajaban con láminas de queratina, que se tratan esencialmente de polímeros. Estos se calentaban en aceite y se le daban forma para crear recipientes de comida. En otras partes del mundo era común trabajar con las cortezas de los árboles para la creación de pequeños recipientes y canoas.

Es hasta que no ocurre la segunda revolución industrial que se empieza a desarrollar el concepto como método de producción. Uno de los experimentos pioneros nació en EEUU, se introdujo una cantidad de nitrocelulosa en un molde de acero y se calentó con vapor a presión lo que resultó en que el material adquiriese la geometría del molde [3]. Parte de la evolución del termoconformado se puede ver a continuación en la tabla 2.1.

Época	Zona Geográfica	Actividad de Termoconformado
Prehistoria	Egipto	Láminas primitivas de queratina son calentadas en aceite caliente para crear recipientes para comida
Prehistoria	América	Cortezas de árboles son calentadas en agua caliente para formar recipientes y canoas
Década 1870	EE.UU.	Hyatt desarrolla nitrato de celulosa moldeable
1910	Inglaterra	Se fabrican teclas de piano utilizando un molde de madera
1930	EE.UU.	Se fabrica la primera botella utilizando termoconformado
1933	Europa	Phillips son los primero en utilizar PVC en una de sus neveras
1938	EE.UU.	Primera máquina industrial automática de termoconformado creada por la empresa Klaus B. Strauch Co.
1938	EE.UU.	Se crea el empaquetado blíster a partir de nitrato de celulosa

Tabla 2.1: Historia del Termoconformado [3]

A pesar de esta información, para comprender en profundidad cómo funciona el termoconformado es fundamental conocer las propiedades y cambios que sufren los componentes más importantes de todo el proceso en sí, los plásticos.

2.3 Polímeros termoconformables [4]

Las palabras *polímeros* y *plásticos* se suelen considerar intercambiables sin embargo, el segundo término se refiere al producto que se distribuye en forma de lámina o gránulo de resina. En el nivel más básico, se sabe que la molécula de un polímero está compuesta por cientos de miles de átomos juntados para formar una cadena que tendrá una longitud extremadamente mayor en comparación con su grosor. De una forma más común, se dice que los polímeros son aquellas cadenas de hidrocarburos que contienen una lista muy amplia de variaciones químicas tales como pueden ser estabilizadores, antioxidantes, tintes correctores de color, ayudas de procesado interno y externo y, a su vez, contienen aditivos para productos con fines específicos como retardantes de llama, colorantes, estabilizadores ultravioletas, etc.

Existen dos categorías de polímeros:

- **Termoplásticos:** Polímeros que son capaces de ser calentados, formados y luego enfriados repetidas veces sin sufrir un cambio substancial en sus propiedades. Este suceso se debe a que las moléculas no tienen uniones químicas permanentes entre sí. Cuando se le aplican calor, dichas moléculas adquieren las propiedades de un líquido viscoso capaz de fluir con la presencia de presión. Una vez son enfriados, se solidifican y adquieren una geometría constante hasta que, de nuevo se les aplique calor y presión. Este tipo de polímero contiene también, la capacidad de aguantar exposiciones a solventes sin que se destruyan las uniones químicas.
- **Termoestables:** Estos tipos de polímeros no fluyen cuando son expuestos a calor y presión ni se puede reformar porque pierden sus propiedades. En vez de fluir cuando son expuestos a altas temperaturas, se transforman en cenizas. Están compuestos por una red de cadenas interconectadas que están unidas permanentemente. Estas redes se conocen como reticulaciones. En comparación con polímeros termoplásticos, tampoco se disuelven cuando son expuestos a solventes, sin embargo sí que se reblandecen y pueden perder su geometría.

En los procesos de termoconformado se trabaja en la mayoría de los casos con termoplásticos.

2.3.1 Temperatura de transición vítrea

Hay ciertos materiales que aparentemente son sólidos y que presentan propiedades de rigidez bastante altas. Sin embargo, cuando se calientan a partir de una temperatura específica, pierden estas propiedades y comienzan a ser más blandos. Esto ocurre en el caso de materiales amorfos de alto peso molecular o materiales que tienen enlaces iónicos fuertes, que dependiendo de su composición química, se hacen maleables con las altas temperaturas. Esa temperatura característica es la que se conoce como la temperatura de transición vítrea. Por encima de esta temperatura el material presenta ciertas características de sólido pero a su vez, también presenta propiedades de flexibilidad. Se empieza con una extremadamente alta viscosidad que va disminuyendo en proporción con el aumento de la temperatura. Hay que destacar que, hay un límite en la disminución de la viscosidad debido a las fuerzas cohesivas débiles que existen en la cadena polimérica que evitan que las moléculas se deslicen entre sí. Lo único que ocurriría con un aumento extremo de la temperatura del material sería lo que se conoce como una descomposición química de la sustancia.

2.3.2 Polímeros para procesos de termoconformado

En procesos de termoconformado se utilizan dos tipos de polímeros que se clasifican a continuación:

- Polímeros amorfos: Son aquellos polímeros que solo tienen una única transición, la temperatura de transición vítrea. Este estado de transición es el que tiene lugar cuando se calienta el material desde una temperatura baja y cambia de forma vítrea a forma elástica.
 - Estado amorfo elástico: Aquí los polímeros se encuentran en temperatura mayor que la de su estado de transición vítreo. Los grupos de átomos que forman las cadenas poliméricas poseen cierta libertad de movimiento. Esto se traduce en que los átomos pueden vibrar, girar y rotar dentro de los límites de las cadenas que los rodean. La libertad

de movimiento se debe a que las cadenas poliméricas pasan a estar sueltas entre sí y rodeados de espacio que no hay en la forma vítrea.

- Estado amorfo vítreo: Los polímeros se encuentran sin ese espacio libre mencionado anteriormente que permite a los átomos moverse libremente. Se crea un comportamiento y se comparten propiedades de cristales. El material se vuelve más frágil y tiende a rajarse cuando se le aplica presión.
- Polímeros semicristalinos: Hay otros polímeros que tienen un segundo estado de transición, son aquellos que tienen, aparte de su estado amorfo, un estado cristalino.

En la creación de materiales a partir de polímeros existen dos tipos dependiendo de la cantidad de unidades monómeras que se utilicen:

- I. Homopolímeros. Se trata de macromoléculas formadas por la repetición de unidades monómeras idénticas, lo que es igual a que no contiene heteroátomos. De manera simplificada se puede decir que es como se denomina a los plásticos que utilizan un solo polímero en su “receta” [5].
- II. Copolímeros. Éstos son macromoléculas constituidas por dos o más unidades monómeras distintas. Los más comunes son formados por dos monómeros que tienen la posibilidad de formar cuatro combinaciones distintas:
 - i. Copolímero al azar: En este caso los monómeros se agrupan de manera aleatoria.
 - ii. Copolímero alternado: Los monómeros se sitúan de manera alternada.
 - iii. Copolímero en bloque: Tal y como el nombre indica, los monómeros de un tipo se agrupan de manera alternada con los de otro formando así un bloque.
 - iv. Copolímero injertado: Se parte de una cadena lineal formada por un monómero y se le agregan ramificaciones de otro monómero [5].

2.3.3 Ventana de termoconformado

En el mundo del tratado de polímeros por termoconformados es importante tener en cuenta lo que se conoce como la *ventana de termoconformado* pues, se trata de un rango de temperaturas en el que el polímero es lo suficientemente deformable pero, a su vez, resistente para que se le pueda dar la forma que se desea. Por lo general, esta ventana de termoconformado es más amplia en los polímeros amorfos que en los cristalinos. En el caso de los polímeros amorfos, oscila entre unos grados por encima de la temperatura de transición vítrea hasta la temperatura de fusión o, incluso, unos grados por debajo de la misma. Por el contrario, en los polímeros cristalinos hay muy poca oscilación y la ventana se sitúa tan solo unos grados por debajo de la temperatura de fusión [6] [7].

2.3.4 Propiedades mecánicas de polímeros

El proceso de termoconformado implica que la lámina sólida de termoplástico sea estirada cuando se le aplica una determinada fuerza. Dicha fuerza que se le aplica al material causa un estiramiento o elongación. Depende exclusivamente de la fuerza por unidad de área, también conocido como tensión, que se le aplica a la lámina, la composición del material y su temperatura. Esta deformación que se produce, en la mayoría de los polímeros cuando se encuentran a una temperatura inferior a la de su estado de transición vítreo, es proporcional a la cantidad de tensión que se le aplica al material. Esta proporción existente se conoce como el módulo elástico o de Young. Depende de la composición molecular del polímero y sobre todo, de la cantidad de aditivos que contiene.

Hay que tener en cuenta que no todos los materiales poliméricos tienen un módulo elástico lineal. Además, al calentar un polímero por encima de la temperatura de su estado de transición vítreo, la curva se endereza. El valor del módulo elástico tiene una relación inversamente proporcional con el aumento de la temperatura, o en otras palabras, decrece. Como consecuencia

de ello, el material se vuelve más blando y la elongación o deformación del mismo aumenta.

Estos factores mencionados son de suma importancia en el proceso de termoconformado porque se trata de deformar una lámina con intenciones de hacerla cubrir un molde, por muy profundo que sea respetando unos límites. Hay otras dos características destacables relacionadas con la tensión-deformación de un polímero. Si el rango de reblandecimiento es demasiado estrecho, es decir, que el termoplástico pase de ser muy rígido a extremadamente blando en un rango de temperaturas muy pequeño, se dice que la ventana de termoconformado será muy estrecha. Otro de los aspectos destacables es si la tensión necesaria para estirar un polímero es siempre demasiado alta independientemente de la temperatura que adquiera, el termoconformado a presión o el termoconformado con vacío no serán métodos que generen las suficientes fuerzas necesarias para conformar el material y hacer que cubra el molde en su totalidad.

2.3.5 Degradación y esperanza de vida de polímeros

Los productos resultantes poliméricos están sometidos a un amplio número de situaciones de desgaste a lo largo de su vida útil. Desde el momento en el que se empieza a darles forma en el proceso de fabricación, se encuentran expuestos a procesos que requieren altas temperaturas y presiones. Una vez que obtienen su forma final, hay otra serie de agentes como puede ser calor, que atacan directamente al material. Desde un punto de vista químico, el oxígeno, solventes, etc. también tienen un rol de degradación importante en la pieza final, dependiendo siempre de su uso. Un último aspecto que presenta gran importancia en la degradación es el uso mecánico entre ellos, los tirones o impactos que se le puedan dar. Cada uno de estos sucesos tiene el potencial teórico de alterar químicamente la estructura del polímero cosa que puede tener resultados graves a nivel macroscópico.

En la mayoría de los casos, lo mencionado anterior se puede solucionar fácilmente con añadirle al material componentes químicos que estabilizan el polímero; antioxidantes, estabilizadores de temperatura o de luz ultravioleta, etc.

2.4 Termoconformado plástico

El proceso de termoconformado se subdivide de acuerdo con el grosor o calibre de la lámina de entrada de material. Hasta un grosor aproximado de 3 mm, el proceso sería de calibre ligero. Cabe destacar que con un grosor inferior de aproximadamente 0.25 mm se está trabajando con lo que se conoce como *film*. Manipular materiales con este grosor ya implica que se utilicen equipos de conformado no convencionales.

A partir de aproximadamente 3 mm el proceso pasa a ser de calibre pesado. En el caso de sobrepasar este grosor y llegar al entorno de 13 mm se comienza a trabajar con placas en vez de láminas y se trabajan con ellas utilizando otros procesos no convencionales de conformado.

Una comparación de las características generales de ambos tipos se aprecia en la **Tabla 1.3** a continuación.

Característica	Calibre Ligero	Calibre Pesado
Grosor inicial de la lámina	<1.5 mm	>3mm
Productos destacables	Embalajes, desechables	Productos industriales
Manejo de las láminas	Rollos	Láminas en palé
Aspectos de control de maquinaria	Automatizada o manual	Automatizada o manual
Número de cavidades del molde	Muchas	Normalmente una o dos
Tipo de molde	Hembra o negativo	Macho o positivo, hembra o mezclado
Material del molde	Aluminio mecanizado	Aluminio fundido, madera, espuma sintética
Tendencia del tamaño de la pieza	Pequeño	Mediano a muy grande
Enfriamiento del molde	Controlado activamente	Activo o ninguno en prototipos
Enfriamiento de la superficie	Normalmente enfriamiento ambiental	Aire forzado o agua pulverizada

Tabla 2.2: Clasificación por tipo de calibre

2.4.1 Etapas comunes en el proceso de termoconformado

Como ya mencionado, el término de termoconformado engloba una serie de procesos industriales que se clasifican en métodos de:

- Compresión
- Soplado (presión positiva)
- Vacío (presión negativa)

tales como el termoconformado al vacío directo, por envoltura, con presión, con molde macho, con molde hembra, con molde coincidente, al vacío con núcleo de ayuda y burbuja de presión, con moldes complementarios, con presión en fase sólida, conformado mecánico. Existen otros menos convencionales como el termoconformado en autoclave y el termoconformado con diafragma. Los mencionados son los de un paso, más simples; también existen los procesos de termoconformado que son de múltiples pasos como: termoconformado por soplado y molde macho, soplado y molde hembra, soplado y vacío, por vacío y con ariete y el método de termoconformado por presión y con empujador.

Sin embargo, aún sabiendo que existen tantas variantes del proceso, todas ellas comparten una serie de pasos genéricos que se llevan a cabo al principio del proceso.

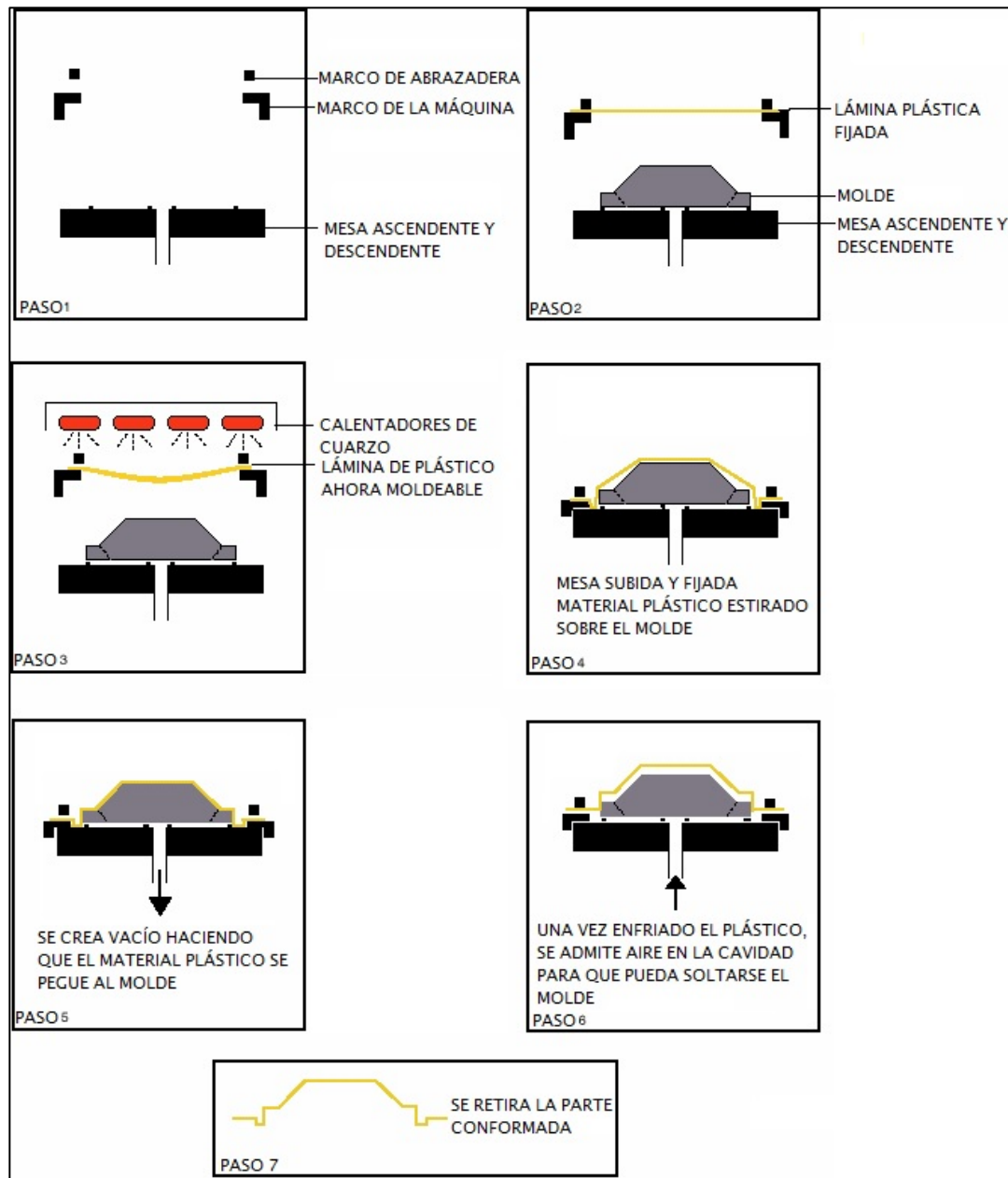


Figura 2-1. Etapas comunes en el proceso de termoconformado

Se comienza con la colocación de una lámina de material termoplástico en un fijador mecánico para que no se suelte mientras se lleva a cabo el proceso. Dicha lámina se calentará, y una vez haya llegado a una temperatura óptima en la que obtiene altas propiedades de maleabilidad, se procede a darle forma a la lámina sin seguir dándole calor. De hecho, el molde que se utiliza está a

una temperatura muy por debajo de la temperatura conocida como la *temperatura de formado*¹. Por lo general y en procesos industriales a menor escala, los moldes son de una sola cara, esto significa que la otra cara de la lámina está expuesta directamente al aire libre. Cuando la lámina queda lo suficientemente fría y, consecuentemente rígida como para mantener la nueva geometría, se retira el molde. Al resultado final se le recorta el material en exceso y, en su posibilidad, se recicla para no generar excesivas pérdidas económicas.

2.4.2 Métodos de termoconformado de un solo paso [8]

2.4.2.1 *Termoconformado por envoltura-vacío*

Se calienta la lámina del material de trabajo y se adapta a un molde macho. En el momento que la lámina entra en contacto con el molde, la parte que se encuentra en contacto directo no sufrirá ninguna deformación. Ligado al avance de la lámina con el molde está la evacuación del aire que se va eliminando poco a poco. Se aplica vacío para deshacerse del aire que queda. La pieza resultante presentará un grosor máximo en la parte inferior de la pieza y un espesor mínimo en la parte superior de las paredes de la pieza. En la *Figura 2.1* se puede apreciar bien este fenómeno. Este tipo de termoconformado tiene uso en aplicaciones de calibre pesado como cartelería exterior o piezas grandes de frigoríficos. También se utiliza bastante en la industria del calibre ligero para fabricar productos que necesitan tolerancias muy específicas como en los casos de contenedores y sus respectivas tapaderas. Al ser un tanto inexacto cuando se utilizan con moldes hembras que tienen cavidades algo más profundas, es un proceso que tiene utilidad con productos en los que es indiferente el grosor de las paredes ya que, no alterará la funcionalidad del mismo.

¹Ver 2.2.3 Ventana de termoconformado

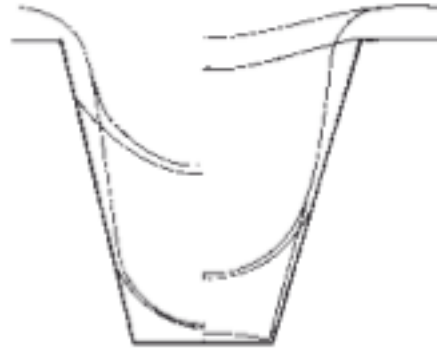


Figura 2-2 Estiramiento diferencial

2.4.2.2 Termoconformado con presión

Se puede considerar que es un proceso análogo al anterior pero, con la gran diferencia de que la fuerza que empuja la lámina se origina por aire a presión. Esto crea la necesidad de sellar la cavidad que hay sobre la lámina para que no se escape el aire utilizado. Se utiliza este método cuando se trabaja con materiales que son difíciles de conformar o incluso, con láminas de gran espesor que requieren detalles más precisos. La *Figura 2-3* representa un ejemplo del proceso.

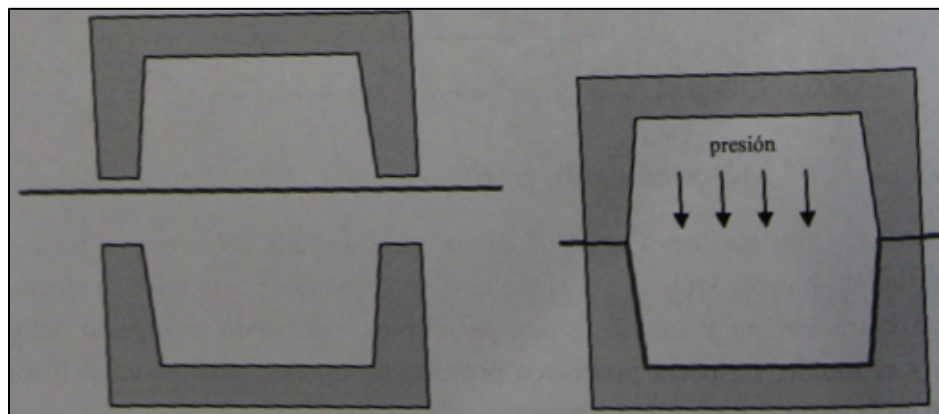


Figura 2-3: Termoconformado con presión

2.4.2.3 *Termoconformado con moldes complementarios*

Resulta de gran utilidad cuando se requiere conformar láminas de propiedades de rigidez excesivamente altas, por ejemplo el metacrilato, en comparación con los materiales más convencionales. Se trata de un molde hembra que se complementa con un molde macho. Hay casos en los que, para obtener mayor definición y un mejor acabado, se aplica vacío y se mejora así el ajuste. El factor a tener en cuenta, el estiramiento, depende estrictamente de la tolerancia de espacio que haya entre los moldes y las fuerzas que se aplican. Un ejemplo del proceso se aprecia en la *Figura 2-4*

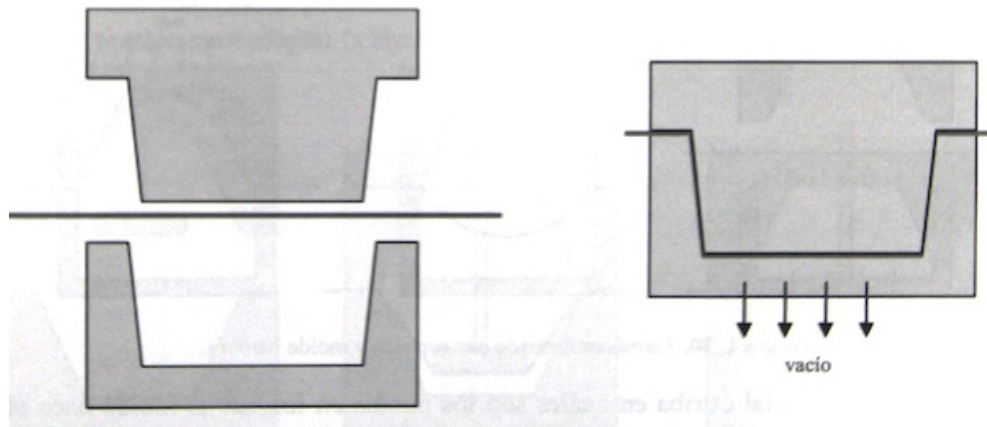


Figura 2-4: Termoconformado con moldes complementarios

2.4.2.4 *Termoconformado con calentamiento parcial*

Este método se utiliza en la gran mayoría de los casos solo con los procesos de calibre pesado. Calentar las láminas de material en algunas zonas favorece el estiramiento de las partes que son más gruesas y ayuda a la uniformidad del grosor del producto a formar. Este método apenas, o casi nunca, se utiliza en productos de calibre ligero porque las piezas son demasiado pequeñas en comparación a los calentadores.

2.4.3 Métodos de termoconformado de múltiples pasos

Estos métodos se pueden definir como aquellos que se efectúan una vez la lámina ha sido ya manipulada. Cuando se trabaja para conformar piezas con espesores gruesos y con detalles muy precisos se parte de láminas que son de grosores mayores que los convencionales. Son imprescindibles cuando se quiere fabricar un producto con un molde hembra que tenga una cavidad demasiado profunda. En el caso de que la uniformidad en las dimensiones del grosor de las paredes de la pieza a formar sea de gran importancia, resulta imposible conformar la pieza utilizando un método de termoconformado de un único paso.

Es posible afirmar que los métodos con varios pasos consiguen cumplir con los requisitos y especificaciones más especiales, ayudándose de un soplado previo, un empujador, o incluso ambos.

2.4.3.1 *Termoconformado por soplado y molde macho o hembra*

La lámina se hincha por soplado con aire a presión y se formará una burbuja que entrará en contacto con el molde macho o hembra. La razón por la que se crea una burbuja previa es para asegurar la uniformidad completa del grosor de la lámina. Posteriormente se aplica vacío que fuerza el contacto completo con el molde. En la *Figura 2-5* y *Figura 2-6* se aprecia con detalle ambos casos.

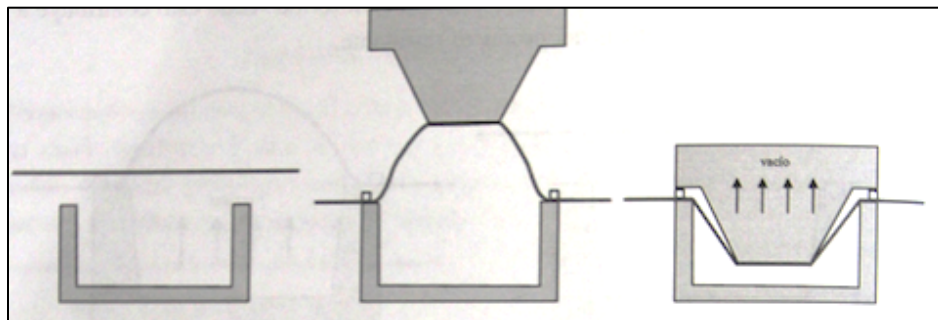


Figura 2-5. Soplado y molde macho

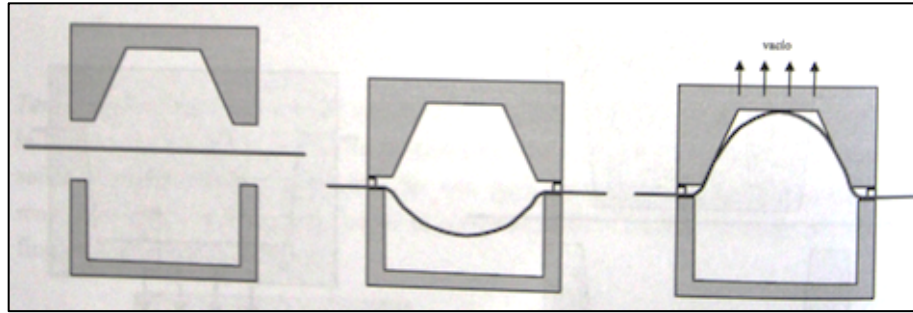


Figura 2-6. Soplado y molde hembra

2.4.3.2 Termoconformado por soplado y vacío

Cuando se trabaja con moldes hembras, es posible hacer lo que se conoce como un preestiramiento de la lámina aplicándole aire a presión para formar una especie de burbuja que garantiza un espesor bastante uniforme. Una vez ha sido creada, se aplica vacío y se fuerza el material contra las paredes del molde hembra. Lo explicado aparece representado en la *Figura 2-7*.

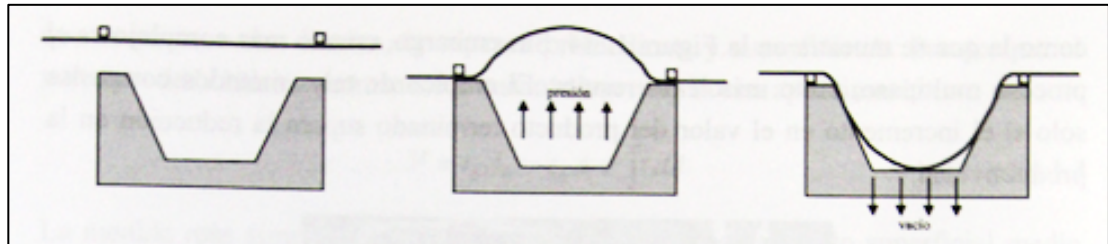


Figura 2-7. Soplado y vacío

2.4.3.3 Termoconformado por vacío con ariete

El preestirado de la lámina se puede llevar a cabo no solo aplicando aire a presión, sino que también se puede efectuar con ayuda de un empujador mecánico. El proceso es simple, se empuja la lámina e inmediatamente se aplica vacío, como se muestra en la *Figura 2-8*, para asegurar el contacto del material y el molde.

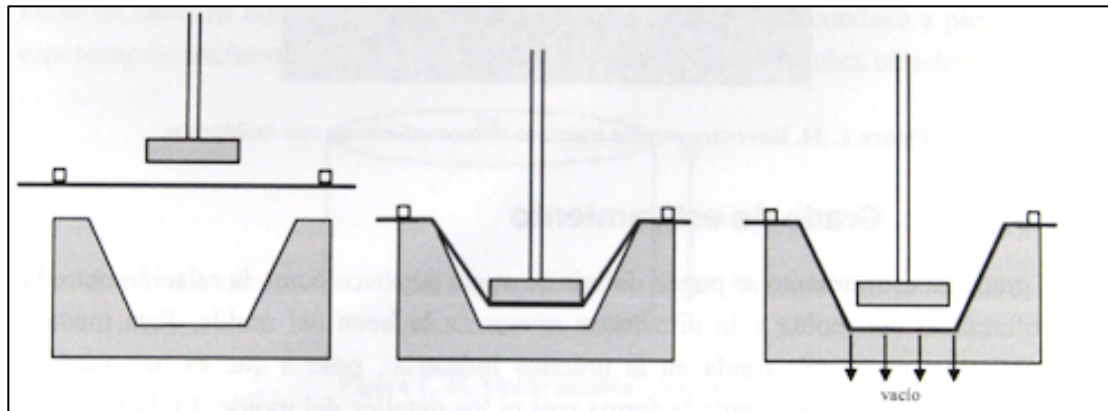


Figura 2-8. Vacío con ariete

2.4.3.4 Termoconformado por presión con empujador

Se trata de un caso análogo al anterior con la diferencia de que se aplica presión para hacer el contacto final de material y molde. La diferencia se ve a continuación en la **Figura 2-9**.

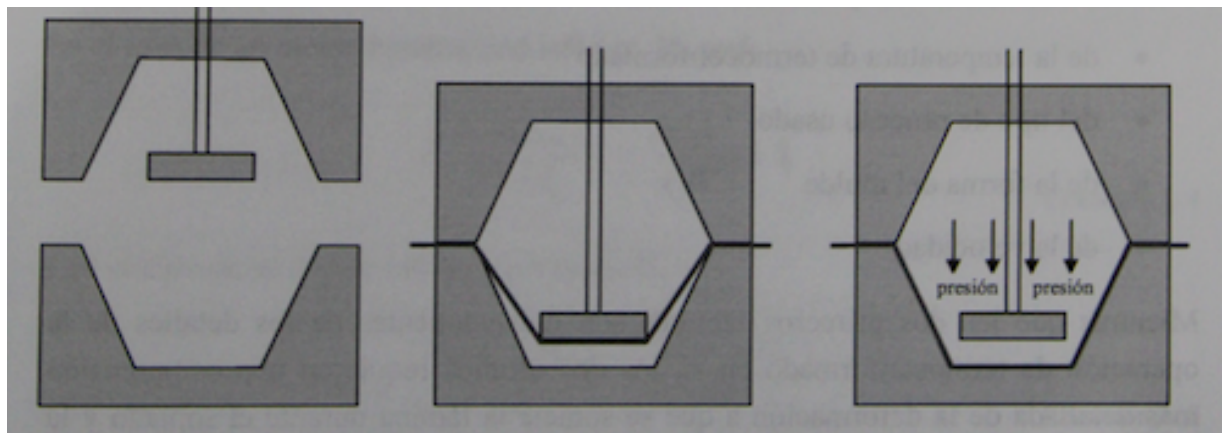


Figura 2-9. Por presión con empujador

2.4.4 Propiedades de termoplásticos utilizados

A continuación están citados algunos de los materiales más comunes que se utilizan para los procesos de termoconformado con sus características y propiedades.

Polietileno de Teraftalato de Glicol (PETG)	
Temperatura máx. de servicio (largo plazo)	65°C
Elongación con ruptura	50 %
Densidad	1.27 g/cm ³
Dureza (Rockwell-Shore D)	R115
Rango de inflamabilidad	UL 94 HB
Absorción de agua	0 %

Polietileno (PE) Negro	
Temperatura máxima de servicio (largo plazo)	90°C
Elongación	> 50%
Densidad	0.95 - 0.96 g/cm ³
Fuerza de tensión	36 MPa
Dureza DIN 53 456 (muesca de bola)	45 - 60 MPa
Rango de inflamabilidad	UL 94 HB
Absorción de agua	0.02%

Policarbonato (PC)	
Temperatura máxima de servicio (largo plazo)	120 °C
Elongación con ruptura	>100%
Resistencia a la tracción en el punto límite	65 MPa
Densidad	1.2 g/cm ³
Dureza (Rockwell-Shore D)	M75
Absorción de agua	0.36 % (saturado a 23°C)

Cloruro de polivinilo (PVC)	
Elongación (% en interrupción)	20 %
Coefficiente de expansión a 23 °C 10^{-5k_1}	8
Grado de inflamabilidad	DIN 4102 B1
Dureza	65 - 80 (shore D)
Módulo de elasticidad	2500 kgf/cm ²
Absorción de humedad (%/24h)	< 0.04
Resistencia a la tracción (MPa)	> 500
Conductividad térmica	0.18 Kcal/m/h°C

Acrilonitrilo butadieno Estireno (ABS)	
Elongación (% en interrupción)	20 %
Coeficiente de expansión a 23 °C 10^{-5k_1}	8
Grado de inflamabilidad	UL 94 HB
Temperatura máxima de operación	90 °C
Módulo de Young	2400 MPa
Conductividad térmica	0.17 W/mK
Fuerza de tensión	45 MPa
Absorción de agua	0.3 %/24h

Poliestireno (PS)	
Temperatura máx. de uso (largo plazo) °C	150
Relación de contracción	0.3 - 0.5 %
Resistencia a la tracción	3 GPa
Dureza	85 (Shore D)
Resistencia a impacto Charpy	3 - 12 kJ/m ²

Polietileno de alta densidad (HDPE)	
Temperatura máx. de uso (largo plazo) °C	110
Densidad	0.93 - 0.97 g/cm ³
Resistencia a la tracción	26.5 MPa
Dureza	R90.7 (Rockwell)
Grado de inflamabilidad	UL 94 HB

2.5 Diseño de piezas [9]

Los elementos generales de cualquier proceso de diseño han de estar establecidos de manera previa a la decisión por el método de fabricación. Se tiene que establecer también cuál es el método óptimo para la fabricación del producto y en el caso de llegar a la conclusión de que es el método de termoconformado ya sea por, geometría, tamaño, grosor de las paredes y demás; es importante tener en cuenta las limitaciones generales que tiene el mismo para poder refinar el diseño. Estas limitaciones; contracciones, tolerancias dimensionales, etc. se vuelven más importantes cuanto más críticas sean las dimensiones de la pieza a formar. La calidad superficial y aspectos específicos de diseño, como pueden ser las dimensiones de una esquina, son aspectos bastante destacables.

En el mundo del diseño es importante tener en cuenta algunos conceptos:

- Si el producto cumplirá todos los requisitos específicos
- Si el producto puede ser fabricado al menor coste teniendo en cuenta el volumen de mercado
- Las consecuencias que se originarán si el producto no cumple los requisitos mínimos

A menudo también es importante tener en cuenta aspectos relacionados con el medio ambiente, si el producto es duradero y facilidad para el reciclado, entre otros.

2.5.1 Parámetros generales que afectan el diseño de piezas

Cuando se trabaja con polímeros es importante tener en cuenta que tienen una serie de características que pueden perjudicar el diseño final de la pieza a fabricar. Existen una serie aspectos característicos del proceso de diseño que también perjudican al mismo.

2.5.1.1 *Contracciones poliméricas*

Las contracciones vienen asociadas al enfriamiento y existen dos tipos; contracciones térmicas y contracciones de orientación.

Contracciones térmicas

Se trata de una propiedad de materiales poliméricos. A un nivel molecular, lo que ocurre cuando se aplica calor al material, aumenta el espacio que hay entre moléculas; esto resulta en un aumento de volumen y disminución de la densidad. Es posible que se ocasione un pequeño aumento de volumen cuando un polímero se calienta superando su temperatura de transición vítrea. Sin embargo, cuando un polímero semicristalino se calienta sobrepasando su rango de temperatura de fusión es que ocurre el mayor aumento de volumen.

Consecuentemente, esto resulta en que un material polimérico tiene mayor volumen y menor densidad cuando alcanza una temperatura de formado en comparación con la temperatura ambiente. Cuando el material calentado se pone en contacto con el molde que se encuentra a una temperatura notablemente menor, su densidad aumenta y su volumen decrece. Esto se traduce en una disminución de las dimensiones de la pieza final.

Contracciones de orientación

Se trata de un factor importante para predecir o determinar las causas de problemas más serios que surgen en el proceso de termoconformado como puede ser la distorsión o variaciones dimensionales. Hay una serie de parámetros que afecta este tipo de contracciones son:

- Temperatura de la lámina en condiciones de conformado
- Uniformidad de la temperatura en la superficie de la lámina
- Uniformidad de la temperatura en el grosor de la lámina
- El ritmo de recristalización de la lámina cuando se enfría con el molde
- La temperatura del molde
- La temperatura de la pieza a la hora de liberarla del molde

2.5.1.2 *Diseño general de la pieza*

Hay que tener en cuenta que en el proceso general de termoconformado hay algunos factores que son inevitables. Se sabe que el proceso parte de una lámina que se estira diferencialmente contra la superficie de un molde. Y que, como consecuencia de ello, las piezas resultantes tienen poca uniformidad en el grosor de las paredes. Sin embargo, hay algunas recomendaciones que se

pueden seguir para poder disminuir esta irregularidad en el proceso de diseño.

Esquina o chaflán [10]

La experiencia indica que las esquinas en piezas tridimensionales tienden a ser excesivamente finas cuando la pieza tiene una altura determinada en comparación con el grosor inicial de la lámina y suele ser un punto de concentración de tensiones. Para remediar esto es recomendable cambiar el diseño del molde, en lo posible, para adoptar la forma de un chaflán puesto que ofrece mejores características de rigidez.

Ángulos de flancos o paredes laterales

Hay ciertas piezas que pueden fabricarse con moldes hembra, éstos permiten que teóricamente haya cero ángulo de flancos. Quiere decir que se permite que las paredes laterales del molde formen hasta un ángulo de 90° con la superficie base. Como se ha mencionado antes en el apartado de *Contracciones*, los materiales poliméricos aumentan en densidad y disminuyen en dimensiones cuando se enfrían; dando lugar a que la pieza de trabajo se separe de las paredes del molde y se facilite la liberación. Sin embargo, en el caso de trabajar con moldes macho, el fenómeno de las contracciones poliméricas no permite que se utilice ningún ángulo de flanco ya que se vería imposibilitado el proceso de liberación de material y molde.

Resulta de suma importancia estudiar dónde están los límites en los ángulos para que se produzca un resultado óptimo en el momento de liberación y no se produzca ninguna deformación.

En la *Figura 2-10* se muestra un ejemplo de un molde hembra con cierto ángulo de flanco que facilitará el proceso de conformado.

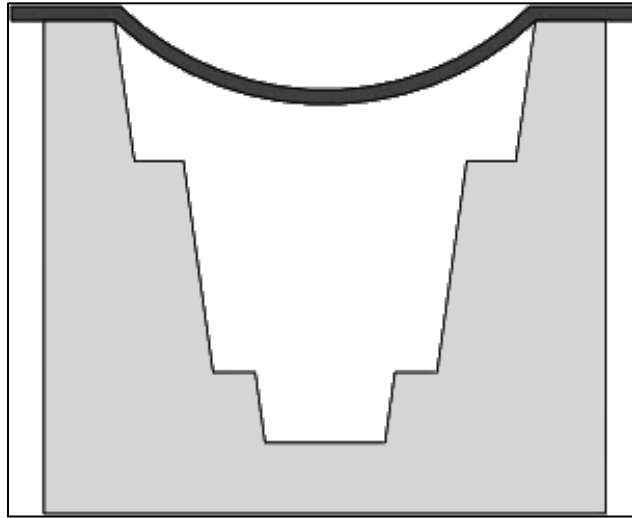


Figura 2-10. Ejemplo de molde hembra con inclinación

2.5.1.3 *Calidad superficial de la pieza resultante*

La calidad superficial de una pieza resultante va a depender directamente de la aplicación que se le dará una vez salga al mercado. En el caso de resultar ser una pieza que no será visible o no tendrá ningún rol que especifique lo contrario, es indiferente que la superficie sea rugosa o no, sin exceder unos límites. Se sabe que la reproducción precisa de la superficie del molde a nivel microscópico viene directamente ligada a la temperatura de la lámina o la presión que se aplica durante el proceso. En los casos en los que es preciso una mayor calidad superficial, se parte del conocimiento que la rigidez de la lámina en el momento del estirado dictará la cantidad de contacto que habrá entre ambas superficies.

Si se ocasiona un caso en el que no se reproduce correctamente la superficie del molde en la lámina de material termoplástico, es necesario variar la presión diferencial de trabajo o la temperatura. Sin embargo, esto en parte resulta redundante en algunos procesos de termoconformado porque no se puede variar la presión que se aplica; como es el caso del termoconformado en vacío. Por lo que, para poner solución al suceso, se incrementa la temperatura y se verá una mejora en el resultado siempre y cuando se respeten las temperaturas de trabajo del material termoplástico.

En los procesos de termoconformado en los que sí se puede hacer una variación de presión diferencial es posible hacer un cálculo matemático para averiguar cuál es la mínima presión necesaria para obtener un nivel específico de detalle. Esto viene dado por la fórmula [10]:

$$\Delta P_{\min} = 4\delta E(T) \left[\frac{h}{d} \right]^3$$

donde ΔP_{\min} resulta ser la presión diferencial mínima, δ es la profundidad del estiramiento de la lámina, $E(T)$ es el módulo elástico dependiente de la temperatura, h es el grosor local de la lámina y d resulta ser el alcance mínimo en cualquier abertura. A continuación en la **Figura X** se ve representado el efecto que tiene la presión sobre el acabado superficial.

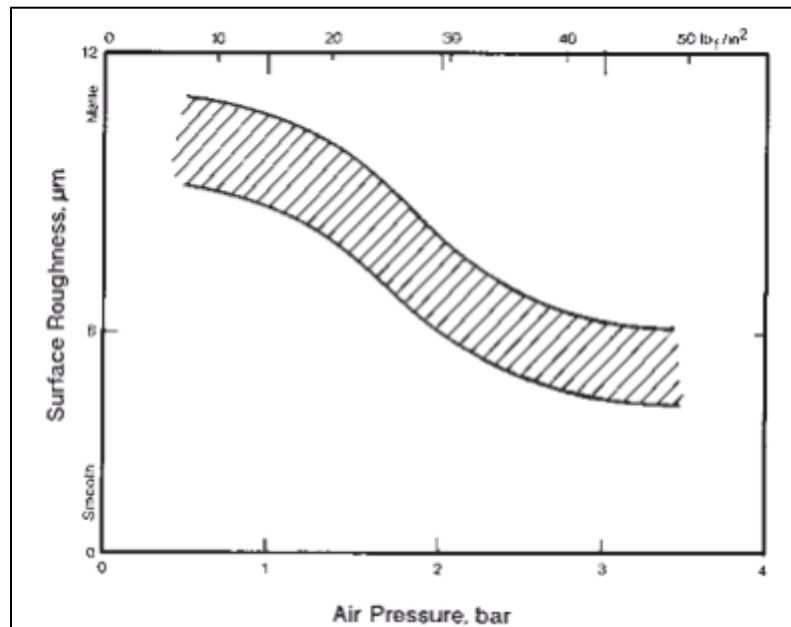


Figura 2-11. Variación de presión frente al resultado de calidad superficial

2.5.2 Aspectos favorables para la rigidez de las piezas

Una de las primeras recomendaciones sería evitar superficies planas demasiado grandes, el uso de rigidizadores benefician la rigidez y harían posible la utilización de superficies planas de mayores dimensiones.

Reforzar la estructura del material con fibra de vidrio es otra opción bastante interesante en el caso de trabajar con poliéster. Sin embargo, esta práctica hace que tenga una apariencia un tanto poco atractiva y surge la necesidad de

tener que utilizar un gel especial que favorece el aspecto visual de dicha pieza final.

2.5.3 Algunas pautas para llevar a cabo un correcto diseño

La experiencia indica que hay una serie de recomendaciones que son muy generales y no necesariamente son aplicables para todos los tipos de diseños. Sin embargo, resulta de interés tenerlas en cuenta a la hora de llevar a cabo el proceso de termoconformado.

- Resulta un suceso muy común que se formen arrugas en las esquinas exteriores tridimensionales en moldes macho o en partes que imitan moldes macho que se pueden encontrar incluidos en moldes hembra. Se puede observar un claro ejemplo del último en la **Figura x.x**. Es posible subsanar estos defectos utilizando un pequeño artefacto encargado de *atrapar* las arrugas.
- Se recomienda un mínimo de ángulo de flanco pues resultará en una mejor liberación del material y molde.
- Es importante considerar el uso de chaflanes pues resultarán en una mejor definición del producto a fabricar; a no ser que, se pueda utilizar un radio generoso en las esquinas.
- En el caso de termoconformado con vacío, se recomienda que haya un radio mínimo en las esquinas que sea al menos igual que el grosor de la lámina. En caso contrario, podría romperse o rajarse la lámina por la zona de la esquina si son demasiado pronunciadas.
- La producción de estrías ocurre cuando hay un cambio brusco en el grosor de una parte específica de la lámina.
- Esquinas muy pronunciadas también afectan el comportamiento mecánico del producto una vez está terminado, haciéndolo susceptible a que sea un punto de concentración de tensiones.
- Es posible utilizar silicona como un agente de liberación del molde y el material termoplástico.
- Se puede utilizar, también, aceite vegetal para liberar el molde del material.
- Lo más rápido que se aplique vacío cuando se conforma una pieza, mejores serán los resultados en cuanto a uniformidad en las paredes laterales, hasta cierto punto.

- Resulta importante hacer el proceso de vacío cuanto antes para evitar que se produzcan las estrías que salen con la disminución de la temperatura del material. Pues resultan ser una consecuencia cuando se rigidiza de nuevo el termoplástico.

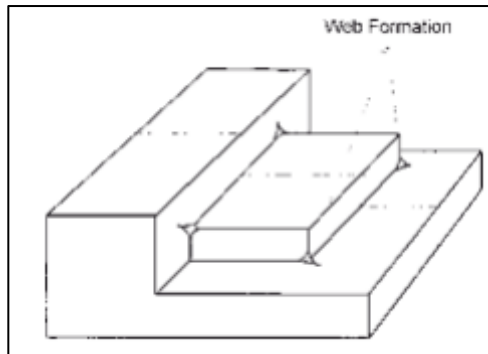


Figura 2-12. Formación de arrugas en esquinas tridimensionales en la parte considerada molde macho [9]

2.6 Moldes

Es uno de los componentes más importantes del proceso de termoconformado y tiene múltiples funciones. Ha de cumplir adecuadamente los requisitos y especificaciones del cliente. Debe ir provisto de una superficie que sea dimensionalmente estable que proporcionará el resultado en la lámina de material termoplástico. Tiene la función de intercambiador de calor, puesto que absorberá la mayoría del calor del termoplástico al ponerse ambos en contacto. En aquellos que son más complejos, ha de haber un sistema de evacuación de aire que se consigue a través de muy pequeñas cavidades taladradas en posiciones de interés.

Aparte, tal y como se mencionó anteriormente, hay una característica que resulta ser una gran ventaja en comparación con otros procesos de termoconformado; la de utilizar una baja presión de vacío. Beneficia al utilitario en cuanto al ahorro de costes y la facilidad de poder formar una muy amplia gama de materiales.

Existe una variedad extensa de materiales que se pueden utilizar como molde, sin embargo es de sumo interés utilizar el adecuado para ciertos tipos de aplicaciones.

2.6.1 Materiales para moldes

Según el fabricante, se recomienda tener en cuenta dos factores en particular, el tiempo y uso que se le da al producto, cuando se opte por la elección de un material para un molde específico.

En caso de tratarse de productos que tengan poca vida útil se recomienda trabajar con termoplásticos tratables a baja temperatura y moldes que sean de madera, yeso o escayola. Sin embargo, si se llega a precisar de productos con una vida útil más larga y la temperatura tratable de los termoplásticos son considerados altos $\sim 150^{\circ}\text{C}$, se recomienda una resina basada en aluminio, o incluso, un molde entero de aluminio.

2.6.1.1 *Moldes de arcilla, escayola [10] [11]*

Los moldes de arcilla son de interés en el ámbito educacional y académico. Permite al usuario crear rápidamente un prototipo de muy bajo coste, para que sea efectivo es necesario reforzarlo aplicándole calor durante cierto tiempo en un horno. Tienen una corta vida útil debido a que las altas temperaturas y presiones del proceso de formado lo deterioran de forma acelerada.

La escayola también es un buen material para la confección de moldes baratos. Sin embargo, es esencial que se permita al material secarse adecuadamente manteniéndolo en un ambiente cálido durante un periodo de hasta tres días. Esto se debe a dos motivos en particular:

- La humedad que puede quedar en el cuerpo se puede filtrar hacia el sistema de la bomba de vacío causando daños internos graves.
- El tiempo es el adecuado para que se adquieran las adecuadas propiedades de rigidez y para que se establezca el contenido de agua.

Es importante destacar que la escayola es un material que puede romperse a pequeños trozos, problema que hace recomendable utilizar un filtro en la boca del extractor de aire para que no se produzca ninguna clase de obstrucción.

2.6.1.2 *Moldes de madera [12]*

Los moldes de madera tienen una vida útil más larga que los anteriores, también tienen la ventaja de ser baratos y fáciles de elaborar. Según fuentes se pueden utilizar en torno a 500 ensayos. Las maderas que más se

recomiendan son *jelutong* y *obeche* por sus propiedades físicas que las hacen más resistentes a hipotéticos agrietamientos durante el proceso de formado. Se elaboran mediante técnicas convencionales de carpintería y tienden a durar más tiempo si se refuerzan con barniz, incluso proporcionan un acabado superficial al interior del producto formado.

Al utilizar estos materiales se recomienda utilizar un producto que facilite la liberación del molde tal que:

- Sprays compuestos de silicona específicos para liberación de moldes
- Grasa
- Vaselina
- Parafina

2.6.1.3 *Moldes de fundición de resinas epoxi*

Los moldes que se fabrican utilizando estos materiales proporcionan una buena calidad superficial y larga duración de utilidad gracias a la facilidad de aumentar las propiedades térmicas y de resistencia al añadir, por ejemplo, polvos de aluminio como endurecedor.

2.6.1.4 *Moldes de aluminio*

En la industria suele ser el material más utilizado como molde para procesos de conformado gracias a la dureza superficial, propiedades conductivas y bajo desgaste. Se trata de un material con una alta relación resistencia – peso. Se elaboran a partir de bloques mecanizados o de fundición en arena y como consecuencia a las propiedades térmicas que contiene, el calor de las láminas de termoplásticos se disipa rápidamente.

Se recomienda tener un buen acabado superficial ya que prevendrá la formación de cavidades en las que quede atrapado aire entre molde y material a formar.

2.6.1.5 *Moldes de aluminio poroso*

Este material fue diseñado especialmente para el termoconformado en vacío, puesto que beneficia el funcionamiento de las herramientas que se utilizan en el proceso. Presenta algunas ventajas sobre moldes de aluminio convencional tales que:

- Al tratarse de un material micro poroso el termoplástico puede mantenerse fijamente en su lugar durante el proceso de conformado.
- Se pueden mecanizar con más rapidez que el aluminio convencional ya que no necesita ventilación específica.
- Se pueden crear moldes con inclinaciones más pronunciadas.

2.6.2 Tipología de molde [11]

Por lo general, existen dos tipos de moldes; uno macho, o positivo, y uno hembra, o negativo. En la *Figura 2-13* se puede apreciar una representación simplificada de ambos ejemplos.

Hay varios factores que rigen la necesidad de utilizar un tipo de molde u otro. Usualmente, la superficie o parte superior del molde es decir, la primera parte en tocar el molde antes de que se estire la lámina de termoplástico, será la parte que quede mejor definida sin ninguna clase de deformación; además de ser la parte que presentará mayor grosor y rigidez.

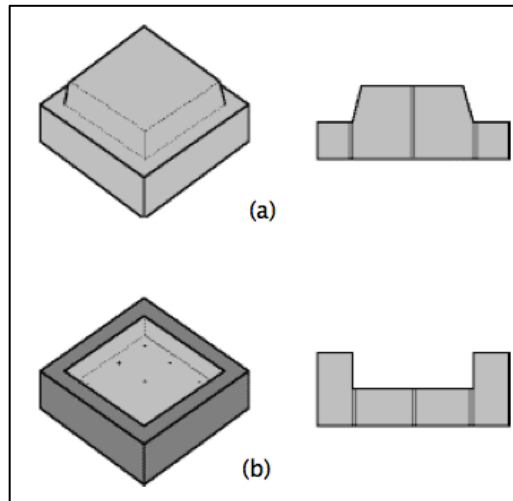


Figura 2-13. (a) Molde macho. (b) Molde hembra

El fenómeno del cambio de grosores se debe a que la zona no será estirada para cubrir el resto del molde. Es más común la utilización de un molde macho, sin embargo, si se necesita un mayor grosor en las paredes laterales, por ejemplo, se utilizaría un molde hembra.

Esto se aprecia representado en la *Figura 2-14*, donde se ven cuáles son las partes del molde que quedarían más definidas y con más grosor.

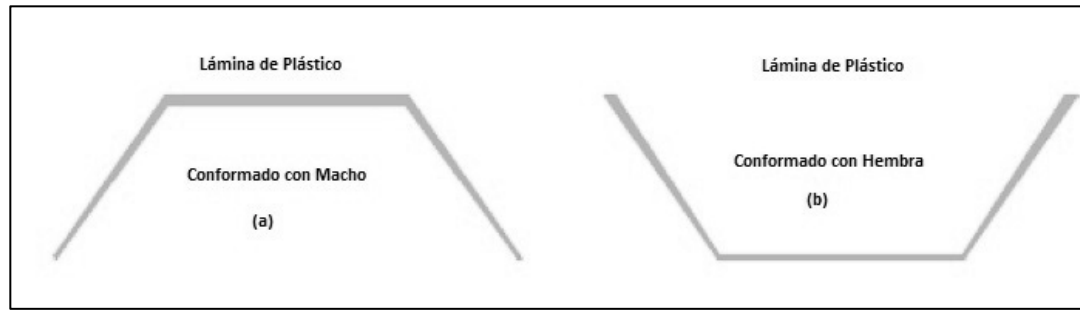


Figura 2-14. (a) Resultado de un termoconformado con molde macho, se aprecia la superficie superior más gruesa que los lados. (b) Resultado de un termoconformado con molde hembra, se aprecia la superficie inferior con menor grosor que los lados superiores.

Como resultado de estudios se indica que quedarán más detallados los lados que se encuentran en contacto directo con el molde, cosa que hace que sea de mayor interés tener en cuenta cuál será el fin utilitario del producto a crear a la hora de elegir un molde en particular.

Cabe destacar que la experiencia indica que una cavidad que sea más profunda que su propio diámetro dará como resultado una extrema delgadez en los laterales del producto final mediante se vaya acercando a la superficie inferior. La fuerza que ocasiona la presión de vacío hará que el material plástico tienda a estirarse elásticamente. Para compensar estas irregularidades se utiliza un núcleo que estirará mecánicamente el material antes de aplicar el vacío.

2.6.3 Bases de apoyo

Los moldes deberían de ir apoyados sobre una base cuando se vaya a realizar el proceso de conformado para que se facilite la liberación de material y molde. En las situaciones en las que se tenga que trabajar de manera veloz con la maquinaria y no se haya incluido un apoyo se ocasionan contratiempos. Al enfriarse el material se contrae, se pega e incrementa la dificultad con la que se despega del molde.

2.6.4 Ventilación en los moldes

Al fabricante le interesa la mayor definición y el mejor detalle posible en los resultados, esto se consigue añadiendo pequeñas cavidades que permiten la ventilación del aire que queda atrapado entre molde y material. Resulta de suma importancia que la lámina que se estira no tenga ningún tipo de restricción que pueda ocasionar cualquier cantidad, por ínfima que sea, de

aire que pueda quedar atrapada. En la *Figura 2-15* se puede apreciar los puntos críticos en los que se colocan los canales de ventilación.

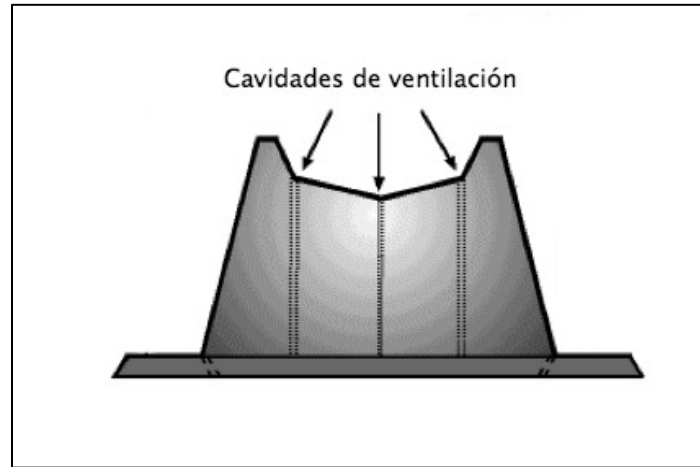


Figura 2-15. Molde con cavidades para la evacuación de aire atrapado

Son colocados ahí precisamente porque la parte central del molde podría considerarse *hembra* y es una zona propensa a que se ocasionen burbujas y pequeñas cámaras donde se acumule aire. La experiencia indica que el material termoplástico se estira por último en las esquinas tridimensionales y bidimensionales, es por esto que resulta de gran interés considerar la colocación de huecos de ventilación en estos puntos. Esto beneficiará a que no se den lugar a irregularidades como las de la *Figura 2-16*. En caso de incluirlos en zonas planas, tienen que ser áreas considerablemente grandes e ir en forma de cuadrícula y por supuesto, respetar las dimensiones indicadas. En la *Figura 2-13* es posible apreciar que en el molde hembra tiene una disposición de cavidades de filtración en forma de cuadrícula.

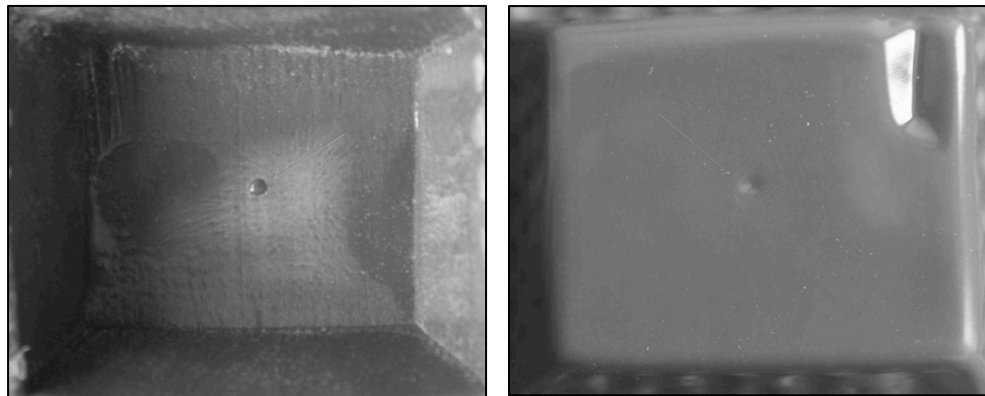


Figura 2-16. Es apreciable la deformación que genera el hueco de ventilación por estar mal colocado. (a) Interior. (b) Exterior

En un proceso ideal debería de haber el mínimo número posible de agujeros de ventilación. Sin embargo, si no se incluyen en moldes que sí son necesarios el material termoplástico se puede incluso enfriar y endurecer antes de que se adquiriera una definición deseada.

El diámetro de los huecos se recomienda que sea menos de la mitad del grosor del material con el que se trabaja o, en su defecto, entre 0.5 y 1mm. En un caso ideal, de conocerse el grosor final de la lámina una vez haya sido estirada, el diámetro del hueco debería ser igual. En caso de no cumplir con estas especificaciones, se producen irregularidades, como en la anterior *Figura 2-16* o incluso, roturas en el material. Esto hará que la pieza quede inútil. El diámetro interior del hueco puede ser más grande siempre y cuando se respeten las medidas para la superficie en contacto directo con el material de trabajo.

2.6.5 Contracciones y respectiva liberación del molde

El material termoplástico tiende a contraerse y disminuir en dimensiones cuando se enfría tras pasar el proceso de conformado. Sin embargo, es posible remediar el problema de la disminución de dimensiones permitiendo un enfriamiento prolongado de la pieza sobre el material. Aunque, en este caso, el remedio es tan solo teóricamente e idealmente correcto pues, el material polimérico se contraería dificultando así su liberación de moldes machos. Dependiendo del grosor y calidad del material termoplástico existen algunos que se contraen más en comparación con otros. Por lo general, termoplásticos cristalinos o semicristalinos tienden a encogerse más que aquellos amorfos debido a una mayor temperatura de uso.

Las contracciones que se producen por cambio de temperatura son llamadas *contracciones térmicas*, resultan ser proporcionales a la diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura de la pieza cuando es liberada multiplicada por un coeficiente de expansión térmica.

Lo recomendado por ciertas fuentes [13] es que se retire el material del molde cuando aún se encuentra a una temperatura templada; inevitablemente, la propiedad de contracción térmica afectará el diseño del molde si hay que tener en cuenta tolerancias específicas para las dimensiones.

Las contracción del material afecta directamente la liberación del mismo del molde pero, esto se puede contrarrestar en la fase de diseño del molde añadiendo una óptima ventilación, un buen acabado superficial y ángulos de flanco considerablemente pronunciados. Como añadido, se puede incluir sprays compuestos de aceites y lubricantes que facilitarán la liberación en casos más complicados.

Ciertas máquinas vienen con sistemas de liberación por aire, como es el caso de la máquina *Formech Compac Mini*. Es necesario un compresor externo y el sistema direcciona el aire introducido a separar el molde del material plástico.

Otra cuestión a tener en cuenta en la liberación de los moldes es que si el molde tiene un ángulo de más de 90° en uno de sus lados es imposible la liberación del mismo a no ser que se coloque de manera inversa. La *Figura 2-17* muestra un ejemplo de este caso.

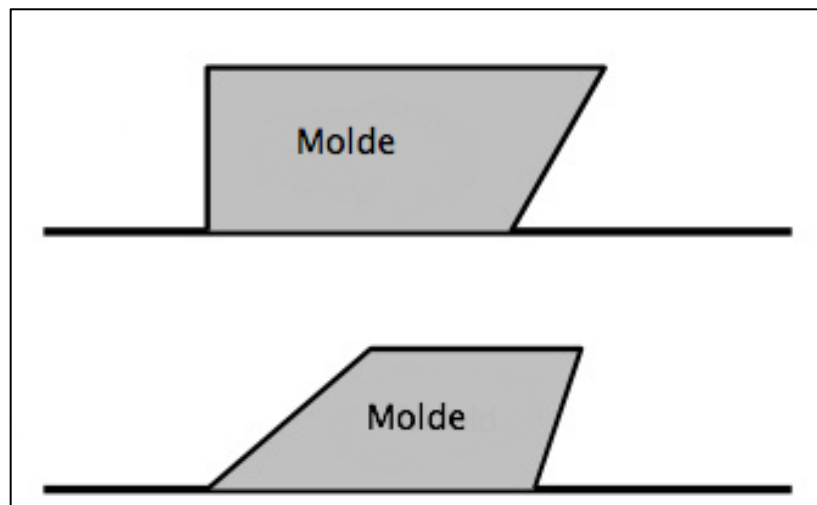


Figura 2-17. (a) Imposibilidad de liberar el material termoplástico del molde debido a la situación del ángulo. (b) Posición óptima de colocación para la liberación del molde.

2.6.6 Defectos ocasionados con los moldes

A continuación se exponen los defectos más comunes que aparecen relacionados con los moldes. Por lo general, existe una serie de pautas y soluciones a seguir para que se puedan evitar.

2.6.6.1 Arrugas [13]

Se ocasionan cuando el material termoplástico de dos caras próximas en un molde se encoge sobre sí mismo. Un ejemplo claro de esto se aprecia en la *Figura 2-18*.

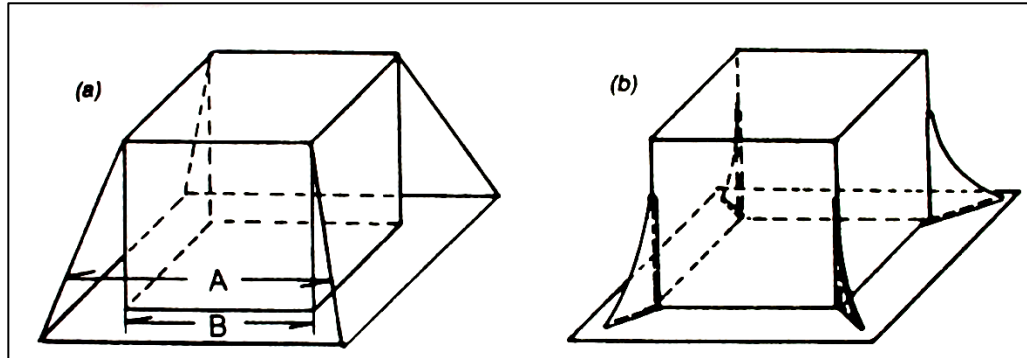


Figura 2-18. Aparición de arrugas. (a) La lámina instantes antes de encogerse sobre sí mismo. (b) Exceso de material concentrado dando lugar a arrugas.

Las arrugas aparecen en las siguientes circunstancias:

- En situaciones que hay varios moldes machos seguidos y muy próximos el uno del otro. *Figura 2-19(a)*
- Cuando el molde es demasiado alto en relación con el área de su base. *Figura 2-19(b)*
- Cuando hay esquinas verticales puntiagudas sin el ángulo mínimo de flanco en paredes.
- Exceso de material termoplástico al utilizar moldes pequeños.

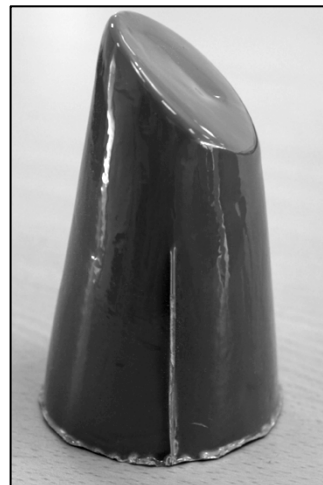
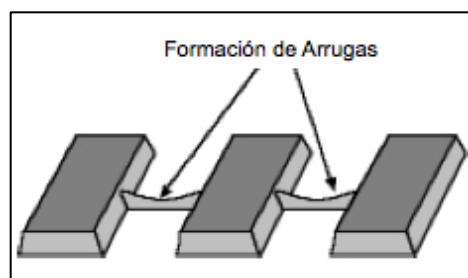


Figura 2-19. Aparición de arrugas por causa de (a) Múltiples moldes machos. (b) Exceso de altura respecto del área de la base.

Para evitar la creación de arrugas cuando se trabaja con varios moldes basta con utilizar moldes hembra en el que el mismo molde separa físicamente cada cavidad. Si es inevitable trabajar con moldes macho, es recomendable que se distancien los moldes $1.75 \times$ altura del molde. Aunque, en los casos en los que es fundamental el ahorro de material y no se pueda reciclar el material sobrante, se hará uso de un separador mecánico, *Figura 2-20*.

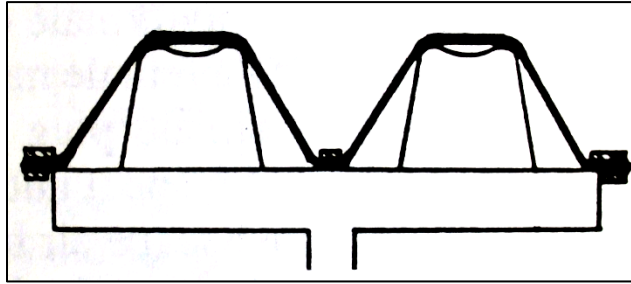


Figura 2-20. Separador mecánico para múltiples moldes.

En el segundo caso, se tendría que pasar a diseñar un molde más bajo en relación con el área de su altura.

Por ultimo sería tan sencillo como utilizar una ventana reductora para poder trabajar con menos material. *Figura 2-21*

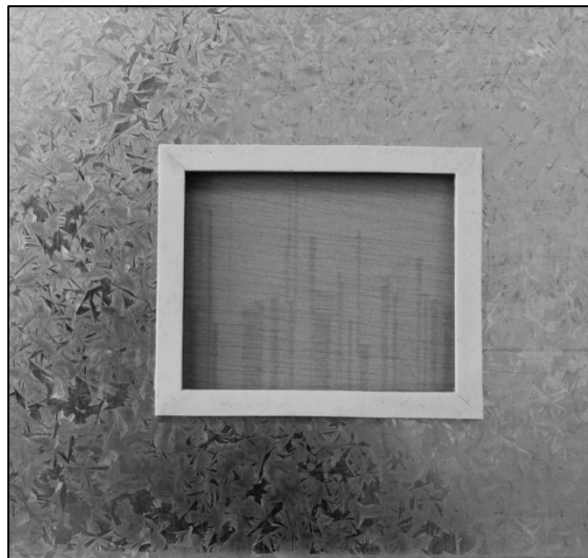


Figura 2-21. Ventana reductora para la utilización de menos material termoplástico.

Existen otras formas para poder reducir la probabilidad de aparición de arrugas como pueden ser *atrapa-arrugas*, se tratan de pequeñas piezas, generalmente pequeñas columnas verticales, que se encargan de acumular el exceso de material termoplástico que se forma en las esquinas, *Figura 2-22*

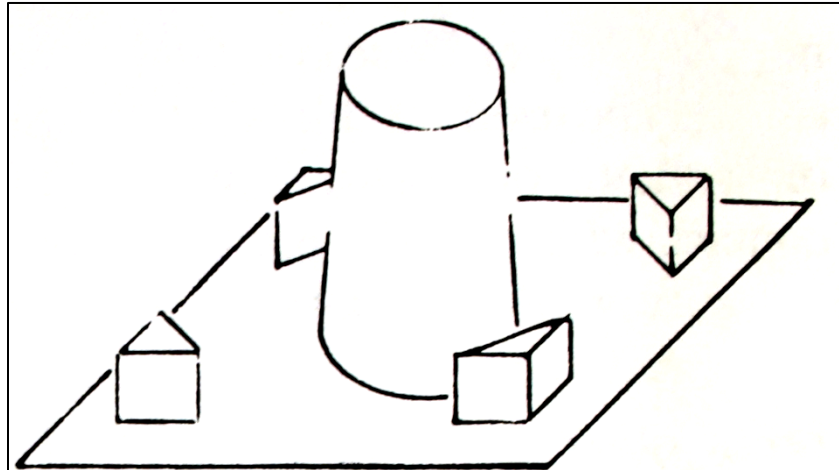


Figura 2-22. Molde con atrapa-arrugas.

Rodear el molde deseado con una anilla con diámetro igual al doble que el de la base del molde y una altura de aproximadamente el 10%, *Figura 2-23*

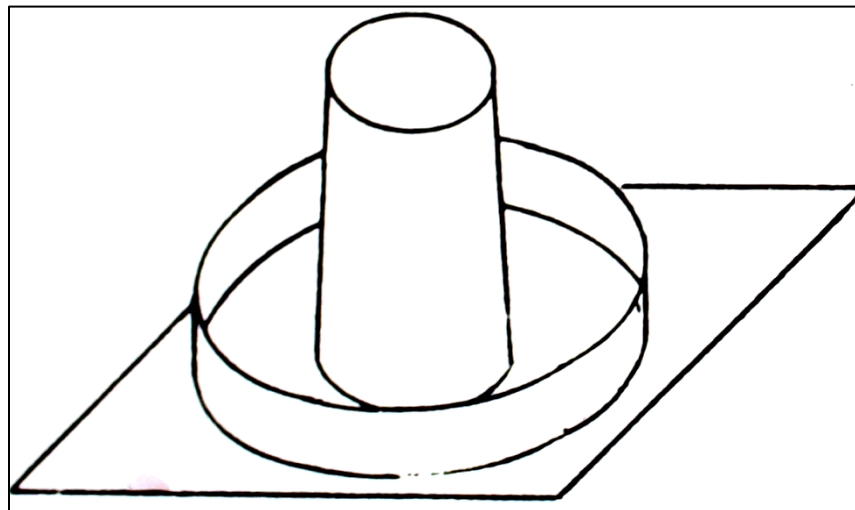


Figura 2-23. Molde rodeado de anilla

Hacer una combinación del molde macho con uno hembra para reducir la altura total del molde, *Figura 2-24*

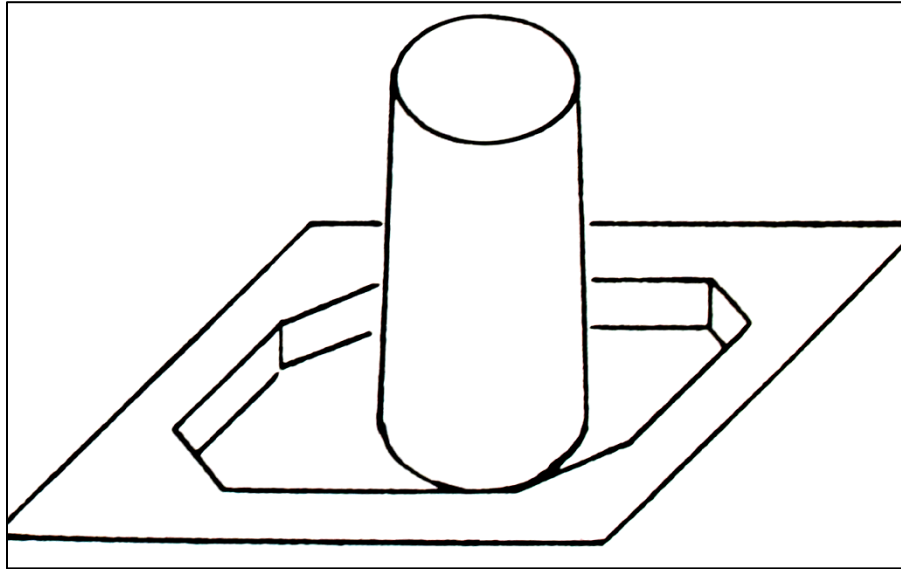


Figura 2-24. Desnivel en el molde

2.6.6.2 Estiramiento y su respectivo coeficiente

En un proceso en el que se estira un material plano o en forma de lámina, se producirá un aumento en las dimensiones del área total, lo que originará como consecuencia, una disminución del grosor en la lámina. Existe un factor decisivo que rige este suceso y se conoce como el “*Coefficiente de Estiramiento*”. Por desgracia este coeficiente varía mucho dependiendo de la geometría que se desea estudiar y formas específicas. Existen tres maneras distintas de determinar el valor del coeficiente:

- En geometrías más complejas es muy difícil de establecer un valor numérico a no ser que, el coeficiente de estiramiento se considere aquel que se calcula con la proporción entre la máxima profundidad del molde y la mínima extensión de la lámina por esa zona.
- La segunda forma de realizar el cálculo es mediante el coeficiente de estiramiento de área; se expresa mediante la proporción que hay entre el área original de lámina dentro del marco de trabajo y el área de la superficie de la pieza resultante. Sin embargo, no es exacto al cien por cien porque es simplemente una aproximación.

- Por último, existe el coeficiente de estiramiento lineal el cual se calcula mediante la proporción que existe entre una línea descrita en un tramo en el que esté el hueco más profundo y la longitud de esa misma línea en la lámina original antes de llevarse a cabo la deformación. Realmente da un resultado sobre el valor de un estiramiento unidireccional, cosa que en la gran mayoría de los casos solo ocurre cerca de los bordes del fijador mecánico. En las zonas centrales hay un estiramiento bidireccional.

Hay que destacar que la reducción de espesor del material es algo que no va directamente ligado a las propiedades del material termoplástico [14]. Por lo tanto, cambiar el tipo de material no necesariamente resultará en acabados mejores. Lo que sí que es de suma importancia tener en cuenta es la profundidad que presenta el molde o bien, la longitud que tendrá que cubrir la lámina termoplástica. Evitar esquinas excesivamente puntiagudas que no dejarán que el material se estire uniformemente y posiblemente pueda ocasionar roturas.

Realmente, la única manera de saber correctamente las dimensiones del grosor de una lámina de termoplástico tras ser conformada es cortando las secciones que se desean estudiar o bien, cortando pequeños discos en las zonas de interés y midiendo con un micrómetro. La razón de esto, por la que no es exacto cualquier estudio matemático, es que la lámina en principio toca una parte del molde y mantendrá por esa zona un grosor constante. Mediante se va estirando y se le aplica vacío, la lámina pierde grosor y va adaptándose a la parte contigua del molde hasta que ha terminado por completo el proceso. Presentará un grosor mínimo en las esquinas inferiores, una aclaración del proceso completo es apreciable a continuación en la *Figura 2-25*.

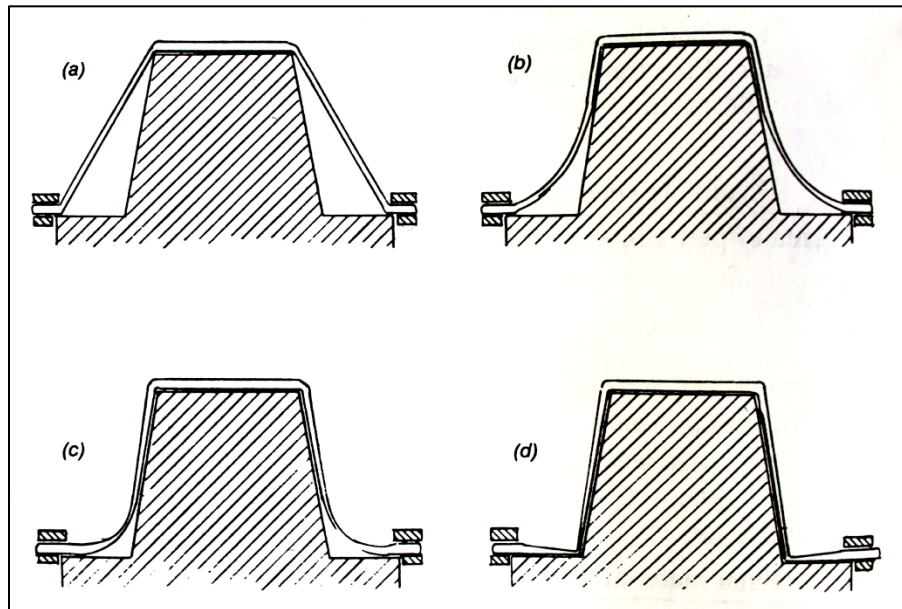


Figura 2-25. Proceso de (a) a (d) del estiramiento de la lámina sobre el molde.

2.6.6.3 Deformación por retorcimiento

Son deformaciones que se pueden ocasionar esporádicamente. Son más probables en moldes que no son simétricos o no están equilibrados. Algunos factores que pueden provocar estas irregularidades son: cambios irregulares de grosor en las láminas por no haber sido extruidas correctamente, calentamiento no uniforme, corrientes incontroladas de aire que puedan atravesar por la máquina enfriando las piezas.

2.6.6.4 Aparición de estrías y marcas por enfriamiento brusco

Hay veces en las que, cuando se trabaja con un molde que tiene una altura notablemente mayor que lo normal, la zona de la lámina que toca primero el molde se enfría. Esto ocasiona que las propiedades de flujo, adquiridas por el calentamiento, disminuyan y haya cambios bruscos de adelgazamiento. Tiene sencilla solución, poner esquinas de desprendimiento algo redondeadas o con chaflanes o bien, no tener una excesiva diferencia de temperatura entre el molde y el material a conformar.

2.7 Mercado [15]

Hay dos sectores principales a los que se destina los productos que se crean con el proceso, productos de relativamente corta duración o calibre ligero, generalmente desechables y productos de larga duración o calibre pesado, generalmente no desechables.

- **Desechables:** estos utilizan láminas de termoplásticos relativamente finas. Se crean, entre otros, embalajes tipo blíster, contenedores o recipientes desechables de comida, vasos de máquinas expendedoras de café, envases de productos farmacéuticos, etc.
- **No desechables:** emplean láminas más gruesas. Sirven para producir paneles del interior del fuselaje de aeronaves, pequeñas vitrinas para medicamentos y material electrónico, estuches para palos de golf, sillas de terraza, etc.

En parte relacionado con la información anterior se tiene la *Tabla 2* en la que se ve parte del destino del material plástico.

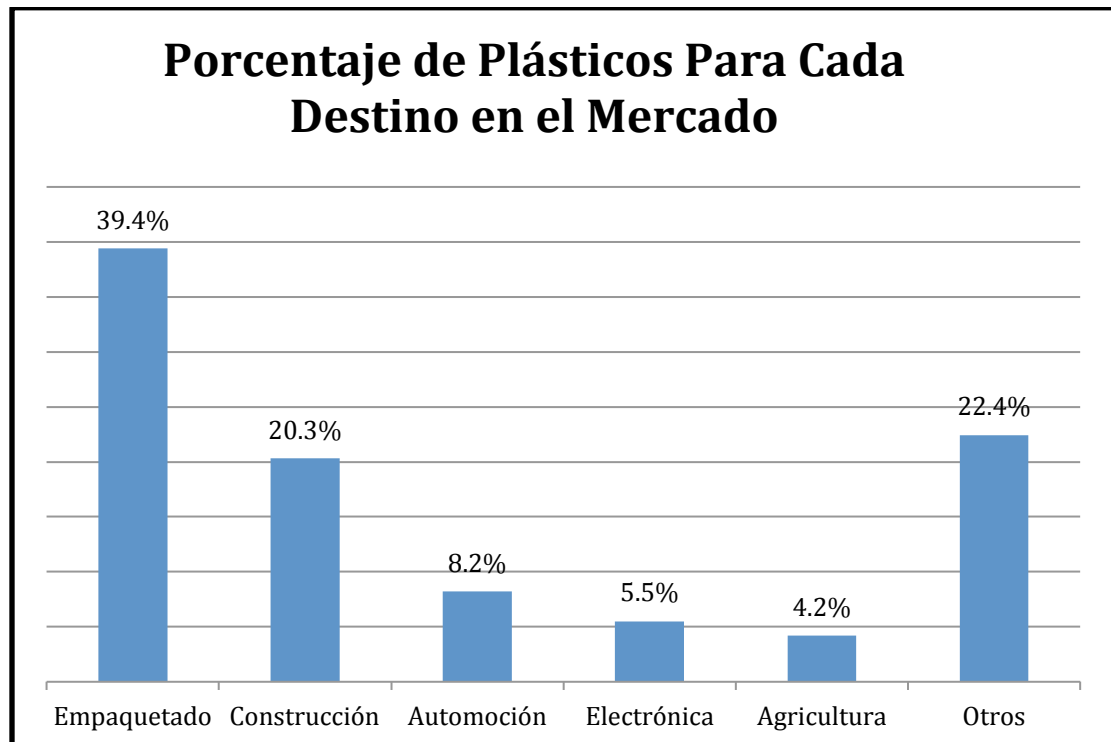


Tabla 2: Destino en el Mercado de Cada Plástico

Sin embargo, estos datos son para todo tipo de materiales plásticos en general y no para el termoconformado en particular. Se estima que el mundo del termoconformado tiene un valor de mercado de aproximadamente 30 mil millones de dólares americanos, con una producción total aproximada de 7 mil millones de kg. Esta información se subdivide de manera gráfica en la *Tabla 3* donde es posible apreciar una descomposición visual del mercado mundial.

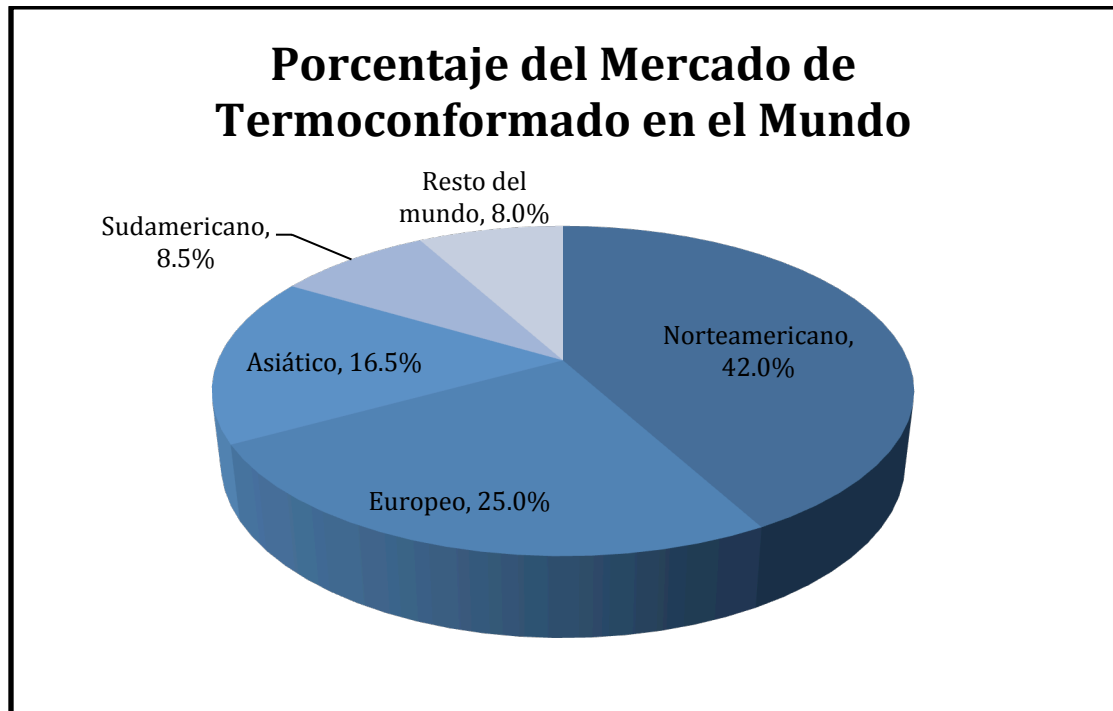


Tabla 3: Clasificación del Termoconformado en el Mundo

Según fuentes [15] se sabe que el mercado de los plásticos tiene un rol sumamente importante en la economía europea gracias a que son utilizados con tantos fines y es, a su vez, uno de los contribuidores mayores para el sector de fabricación de la Unión Europea. Esto último, se respalda con que por cada puesto de trabajo creado en el sector de la producción de plásticos, se crean casi 3 puestos de trabajos a lo largo de la cadena económica mundial [16].

Gracias a un reciente estudio llevado a cabo por la asociación de fabricantes de plásticos europeos fue posible aprender que:

- El sector industrial de tratos con materiales plásticos da trabajo a más de 1,45 millones de personas en Europa.
- Existen más de 60000 empresas operarias.
- Se produjo un volumen de negocio total europeo de aproximadamente 320 mil millones de euros en el año 2013.
- Se recicló más de 6,6 millones de toneladas de material plástico.

Las estadísticas a continuación son parte de un estudio de mercado por parte de la asociación de fabricantes de plásticos de Europa.

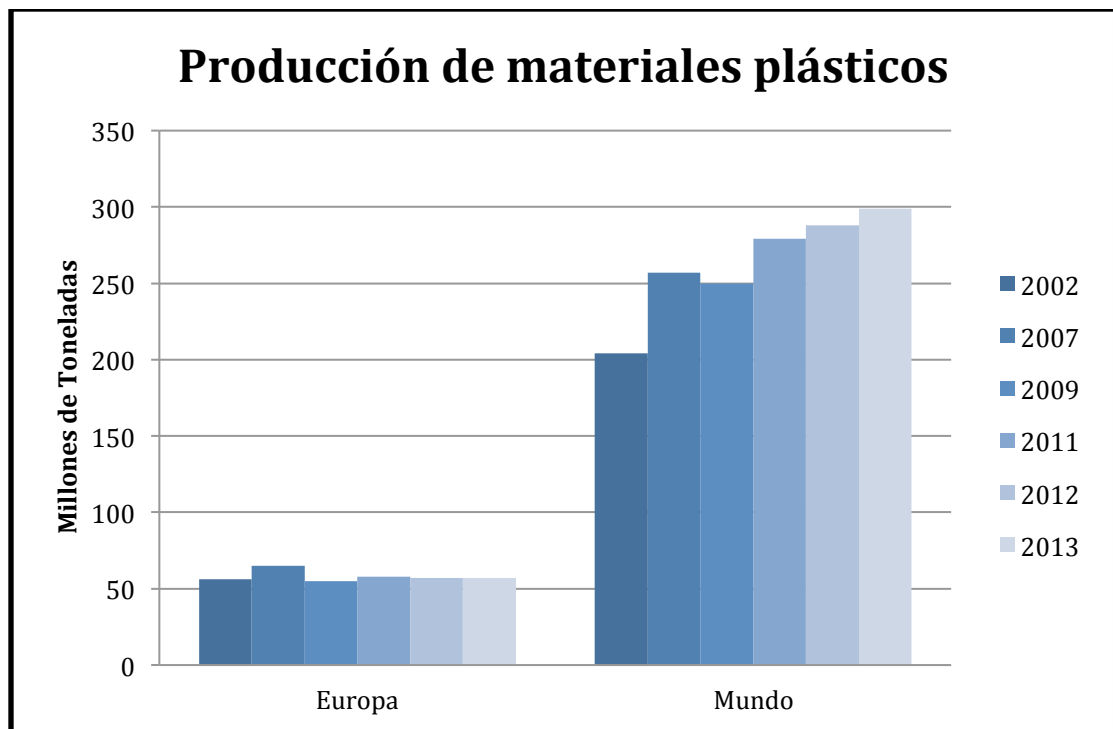


Tabla 4: Comparativa de Producción de Materiales Plásticos Europa - el Mundo

3 CAPÍTULO III. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 Introducción

Es preciso tener amplios conocimientos en los procesos de termoconformado plástico para poder realizar correctamente un ensayo. Hay cierta ciencia detrás de los pequeños detalles que hacen de este proceso uno tan interesante. Es por eso que mediante la realización de varias pruebas y experimentos se adquiere la sapiencia necesaria para poder ejecutar de manera óptima el proceso en sí. En el caso de no realizar esto previamente, es posible que se produzcan muchas irregularidades y no se trata precisamente de un material de bajo coste el que se utiliza en el proceso como para poder desperdiciarlo.

El procedimiento por el cual se ha optado en este TFG consiste en realizar una serie de moldes de distintas geometrías y detalles con el fin de examinar, tras la realización del proceso, las limitaciones que presentan los materiales a la hora de reproducir dichas geometrías. Este estudio proporcionará unos valores y/o resultados óptimos de utilización de la máquina termoconformadora plástico que aplica vacío.

Se realiza un estudio utilizando tres tipos distintos de materiales; HIPS de 1 mm y 1.5 mm de grosor, polietileno (PE) de 3mm de grosor y polimetilmetacrilato (PMMA) de 3 mm de grosor.

Se hará un estudio de la forma que tienen las piezas, concretamente el espesor de las paredes laterales de las probetas termoplásticas pues, este grosor depende directamente de distintos factores:

- Temperatura óptima de trabajo
- Forma del molde - Ángulo de flanco
- Forma - Acabado de los vértices
- Presión de vaciado

Es necesario añadir que al ser una máquina de gama media, no cuenta con un termostato, sino con una temperatura fija y un temporizador. Es necesario hacer un estudio termográfico de la máquina para determinar la cantidad de calor que se transmite cada cierto periodo de tiempo.

3.2 Equipo utilizado

Para poder realizar el estudio de los parámetros mencionados anteriormente se ha recurrido a la utilización de varios equipos. A continuación se describen brevemente los dichos equipos utilizados.

3.2.1 Termoconformadora Formech Compac Mini

Como es de notar, un proceso de termoconformado plástico se realiza con una máquina con fin específico para el proceso. Para el estudio de este TFG se utiliza una máquina termoconformadora plástica modelo Formech Compac Mini. Dicha máquina cuenta con un compresor encargado de producir una depresión entre los sellos de la estructura metálica de soporte del material.

A continuación en la *Figura 3-1* aparece una ilustración de la máquina termoconformadora plástica que aplica vacío.



Figura 3-1. Formech Compac Mini

3.2.1.1 Características

Características generales de la máquina

- Ancho de la máquina: 490mm
- Altura de la máquina: 440mm
- Profundidad de la máquina: 820mm
- Consumo energético: 0.75W

Características de trabajo de la máquina

- Área teóricamente máxima de la lámina de conformado: 250 x 300mm
- Área de conformado: 230 x 280mm
- Profundidad máxima de vaciado: 130mm
- Grosor máximo de lámina plástica: 4mm

3.2.1.2 Funcionamiento de la máquina

La máquina Formech Compac mini es una termoconformadora plástica de uso doméstico que termoconforma láminas de material termoplástico. Cuenta con 6 resistencias de cuarzo que son las encargadas de calentar el material hasta un punto en el que es lo suficientemente maleable y reblandecido que es capaz de adaptarse a la geometría del molde del que es expuesto.

Cada material tiene un rango de temperaturas de trabajo determinado y dependiendo del grosor del mismo, se expondrá a una cantidad de tiempo a la fuente de calor.

Para realizar un ensayo es necesario tener un molde fabricado que se colocará en la zona designada para ello. Sin embargo, hay que asegurarse previamente que en el hueco del molde está la rejilla que se encarga de hacer que no se obstruya por contacto directo el molde con la pequeña abertura que da acceso al compresor para realizar la función de depresión. Encima de esta rejilla se coloca el molde que dará forma final al material termoplástico.

Para poder calentar la lámina es importante que previamente se haya colocado en el lugar del fijador mecánico y se ajusten los tornillos de tal manera que quede fija y no haya ningún hueco por el que pueda haber acceso de aire exterior.

Es posible utilizar una ventana reductora en este lugar para poder trabajar con menor cantidad de material termoplástico.

Hay unos sellos que se encargan de crear una zona estanca entre el material y el hueco en el que se introduce el molde.

La máquina cuenta con una palanca que se utiliza para forzar el molde contra el material ya calentado.

Cuando el material está en contacto con el molde, lo siguiente que se hace en el proceso de termoconformado de vacío es precisamente activar la bomba de vaciado que causará que se acentúen los detalles del molde. El indicador de depresión que viene en la parte exterior de la máquina indica un máximo teórico de -1 bar sin embargo en la práctica esta máquina tan solo llega a -0.9 bar. Se activa mediante el interruptor y cuando se ha realizado el proceso durante unos segundos se acciona el mismo interruptor para apagar el compresor.

Es importante dejar enfriar un breve tiempo el material para que adopte correctamente la rigidez necesaria para mantener la geometría del molde. En caso contrario, al bajar la bandeja que soporta el molde, se podrían causar deformaciones en el resultado que harían inútil el ensayo.

Una vez se retira el material del fijador mecánico, es común que se quede el molde pegado al material termoplástico; en tal caso se retirarán de manera manual procurando no destruir los resultados. Por el contrario, hay ciertos casos en los que no se podrá separar el molde del material porque no se respetan algunos de los parámetros de diseño de moldes; en dicho caso es necesario destruir o bien el molde, o bien el resultado termoplástico para conseguir la liberación.

3.2.2 Cámara de termografía Fluke TiX560

Al ser la termoconformadora una máquina de gama media, resulta que no tiene un termostato, sino que trabaja con una temperatura máxima fija y a partir de esa temperatura hay que determinar la cantidad de tiempo que tarda en hacer la transferencia energética de calor al material termoplástico. Como se conocen las temperaturas de la *ventana de termoconformado* de cada material de trabajo, es necesario averiguar la temperatura a la que trabaja la máquina.

Este estudio se realiza con una cámara de termografía *Fluke TiX560*.



Figura 3-2. Fluke TiX560

3.2.2.1 Características

- Lente articulada de 180° para imágenes en posiciones poco accesibles.
- Autoenfoque LaserSharp
- Capacidad de medida de hasta 1200°C
- Resolución de 320 x 240 píxeles
- Distancia focal mínima de 45 cm
- Sensibilidad térmica de 0.045°C
- Puntero láser
- Con capacidad de edición mediante software de:
 - Emisividad
 - Temperatura del fondo
 - Transmisividad
 - Alarmas de color

3.2.2.2 Funcionamiento de la máquina

Mediante la utilización de unos sensores es capaz de medir la radiación infrarroja y, a consecuencia de ello, la temperatura a la que se encuentra la zona que se mide. Se utiliza una cinta adhesiva aislante para no comprometer los resultados de las mediciones por los reflejos de luz que se originan en la superficie metálica de la máquina termoconformadora. El software específico de la cámara se encarga de procesar los datos y generar unos resultados.

3.2.3 Moldes manuales

Para la creación de los moldes hechos a mano se utiliza una pasta para modelar *Pasta Plus SIO-2*.



Figura 3-3. Arcilla para modelar Plus.

3.2.3.1 Características

- Arcilla natural en formato de 1 kg
- Secado al aire en aproximadamente 36 horas
- Inodora

La forma más sencilla de hacer los moldes es a partir de pequeños cubos y después haciendo un cálculo manual de las dimensiones y marcándolo en los moldes para poder utilizar la lijadora que desbastará el material. Se crean dos series de moldes, unos con vértices acabados en filo y otra serie con los vértices superiores acabados en chaflanes de 45°x0.5 mm ambas series con paredes laterales de 0, 5, 10 y 15 grados de inclinación.

3.2.4 Lijadora BOSCH PSS 250 AE

Una vez que los moldes hechos a manos son secados al aire, es preciso darle un buen acabado superficial y la geometría final deseada utilizando una lijadora *BOSCH PSS 250 AE*

3.2.4.1 Características de la herramienta

- Peso 1.6 kg
- Dimensiones 39 x 29.5 x 12 cm
- Voltaje 240V
- Potencia 250W
- Amperaje 1.05^a
- Lijas de P80 y P120

3.2.5 Moldes en ureol

Se trata de hacer un total de 24 moldes que se dividen en tres grupos.

1. Moldes con esquinas vivas.
2. Moldes con esquinas terminadas en chaflán 0.75x45°.
3. Moldes con esquinas redondeadas R0.75mm.

Cada categoría de moldes cuenta con moldes de 2,3,4,5,8,10,12 y 15°. En el **Anexo X** aparecen de forma detallada los planos de las piezas.

Son fabricados a partir de un material llamado Ureol que viene en formato de plancha de 50mm de grosor y una superficie de trabajo de 500 x 1000 mm.

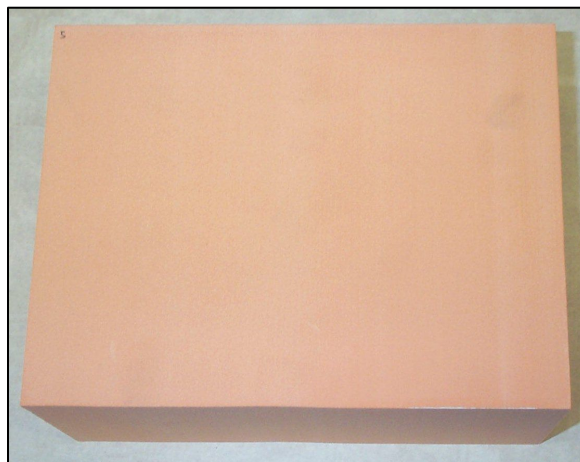


Figura 3-4. Ureol

3.2.6 Máquina Abrasive Waterjet TCI Cutting BPC 3020

La plancha de ureol se corta con una máquina de *Abrasive Waterjet Machining* TCI Cutting BP-C 3020 en la que, con ayuda de una bomba y aire a presión, se genera un chorro de agua abrasivo que es capaz de cortar sin impedimento alguno el material con un resultado superficial excelente.



Figura 3-5. Máquina TCIcutting BP-C de corte por chorro de agua abrasivo

3.2.6.1 Características de la máquina

- Grosor máximo permitido 200 mm
- Peso máximo de 790 kg/m²
- Velocidad de colocación máxima de 70m/min
- Velocidad máxima de avance de 20m/min
- Tolerancia ± 0.05 mm/m

3.2.7 Máquina CNC EMCO Concept MILL 55.



Figura 3-6. Máquina CNC 3 Ejes EMCO Concept MILL 55

Las limitaciones que presenta la máquina de corte por chorro de agua es que no se puede mecanizar en una tercera dimensión, por lo que es necesario seguir mecanizando la pieza con ayuda de una máquina CNC de 3 ejes.

3.2.8 Máquina de medida por visión TESA VISIO 300GL

Para probar la efectividad de la máquina de corte por chorro de agua abrasivo y la máquina CNC, se comprueba con el microscopio los ángulos de inclinación que hay entre las paredes laterales.



Figura 3-7. TESA VISIO 300GL

3.2.8.1 Características de la máquina

- Óptica: la máquina está equipada de manera estándar con zoom motorizado y cámara de color.
- Iluminación: está dotada de fuentes de luz con diodos electro-luminiscentes. Consta de una iluminación diascópica útil para las imágenes de perfil y medida por transparencia, una iluminación anular con dos segmentos ($4 \times 90^\circ + 8 \times 45^\circ$) útil para la iluminación de superficie, fresado, taladro, chaflanes y bordes redondeados y una luz coaxial útil para los agujeros ciegos y las piezas cilíndricas

3.3 Materiales

3.3.1 Materiales termoplásticos utilizados

Los materiales elegidos para los ensayos de termoconformado como sus grosores son:

- Láminas de Polimetilmetacrilato PMMA de 3 mm
- Láminas de HIPS de 1 y 1.5 mm de grosor
- Láminas de polietileno PE de 3 mm de grosor

3.3.2 Especificaciones de los materiales

A continuación vienen descritos en forma de tabla algunas de las propiedades más comunes de los materiales mencionados.

Polietileno (PE) Negro	
Temperatura máxima de servicio (largo plazo)	90°C
Elongación	>50%
Densidad	0.95 - 0.96 g/cm ³
Fuerza de tensión	36 MPa
Dureza DIN 53 456 (muesca de bola)	45 - 60 MPa
Absorción de agua	0.02%

Polimetilmetacrilato (PMMA)	
Temperatura máxima de servicio (largo plazo)	120°C
Elongación	2.5%
Densidad	1,17- 1.20 g/cm^3
Fuerza de tensión	36 MPa
Dureza DIN 53 456 (muesca de bola)	70MPa
Rango de inflamabilidad	UL 94 HB
Absorción de agua	0.03%

3.4 Estudio térmico de la máquina

Antes de comenzar a trabajar con la máquina es fundamental conocer bien con qué se trabaja. Como ya se mencionó con anterioridad, la máquina no cuenta con un termostato y es de suma importancia conocer cuánto tiempo se tarda en transmitir al material termoplástico la temperatura para que llegue a su rango ideal de maleabilidad.

3.4.1 Medición de temperatura

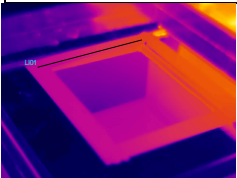
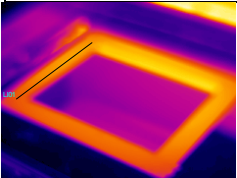
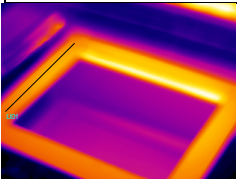
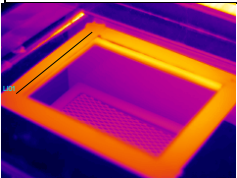
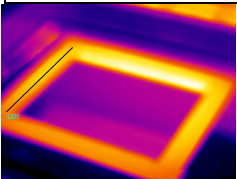
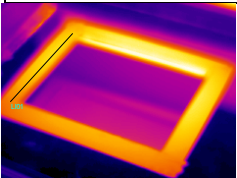
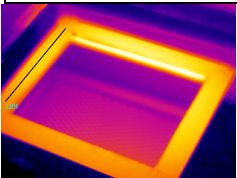
El primer impedimento que aparece es la falta de una escala que indica la temperatura a la que se pone la máquina. Es uno de los factores más importantes a tener en cuenta porque determinará si se puede realizar o no la prueba de termoconformado.

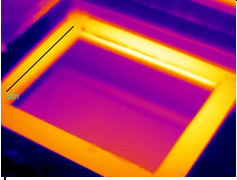
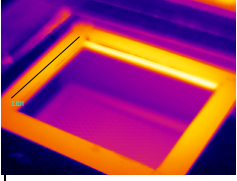
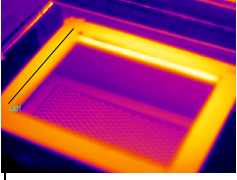
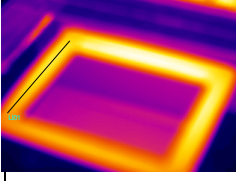
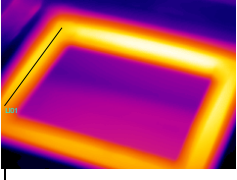
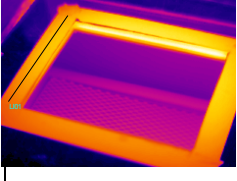
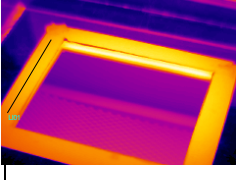
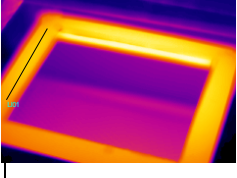
En la zona metálica de calentamiento de la máquina se tuvo que pegar una serie de trozos de cinta aislante que mostrarían la temperatura real que se mediría con la cámara de termografía.

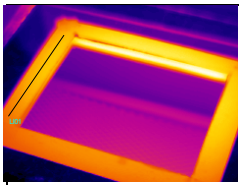
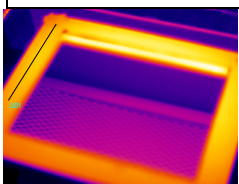
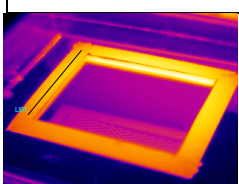
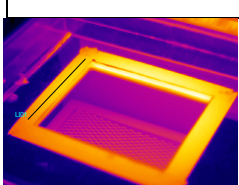
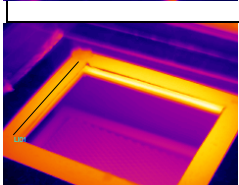
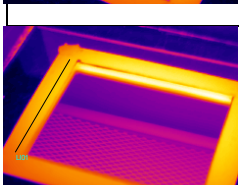
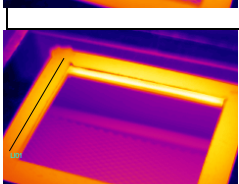
Lo primero que se hace es dejar la máquina 15 minutos encendida para que llegase a su temperatura máxima. Es la primera temperatura que se mide varias veces para comprobar que está calibrada la cámara y determinar un punto máximo de estudio. Tras el enfriamiento de la zona de calentamiento se realizan un total de 21 mediciones en intervalos de tiempo de 10s empezando en 30s hasta 240s.

Tras cada medida de temperatura es necesario dejar la máquina enfriar hasta su temperatura de inicio para poder determinar correctamente el tiempo al que tiene que estar expuesto el termoplástico para que se realice bien la transmisión de calor y llegar a la temperatura teórica de termoconformado.

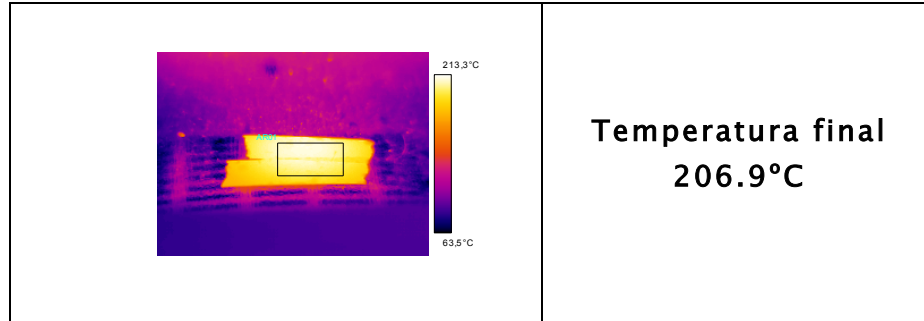
A continuación están recopilados en una tabla los resultados de las pruebas de medición de temperatura.

Imagen	Tiempo Exposición (s)	Tiempo Enfriamiento (min)	Temperatura Promedio Línea (°C)	Temperatura Max-Min Línea (°C)
	30	5	60,5	7,6
	40	5	85,4	15,3
	50	5	93,2	12,5
	60	5	94,2	18,2
	70	5	109,2	18,1
	80	5	94,4	17,2
	90	7	105,1	15,3

	100	7	109,2	14,7
	110	7	126,5	18,0
	120	8	132,3	20,7
	130	8	132,4	23,5
	140	8	136,3	17,5
	150	8	136,7	22,7
	160	8	142,9	17,3
	170	8	148,8	13,0

	180	9	148,8	22,7
	190	10	145,4	14,6
	200	10	145,7	23,6
	210	12	143,8	24
	220	14	147,3	25
	230	20	153,9	29,4
	240	20	153,7	24,4

Resultados de determinación de temperatura máxima tras 20 minutos de calentamiento sin parar.



3.5 Metodología experimental

3.5.1 Introducción

Para llevar a cabo el estudio se utilizan láminas de los materiales ya mencionados. Vienen en formatos de 240 x 190 mm, que es el equivalente a la zona de termoconformado. Sin embargo, debido a que se cuenta con una cantidad justa de material termoplástico, se reducen las láminas a las dimensiones de la ventana reductora de 120 x 95 mm.

Es necesario confeccionar una serie de moldes que serán los que den los resultados de los ensayos en el termoplástico que posteriormente se cortará en cuatro partes, transversalmente por sus laterales y se medirán con un micrómetro en tramos de 5mm. Este estudio mostrará las tendencias y deformaciones que ocurren en los ensayos.

3.5.2 Creación de los moldes

3.5.2.1 *Moldes hechos en arcilla para modelar*

Estos moldes son los primeros que se utilizan. Tienen un rol importante que será el de proporcionar un conocimiento básico de la máquina al usuario. Con ellos se hacen pruebas de determinación de temperatura óptima de trabajo, presión de vaciado óptima de trabajo y tiempo aproximado de enfriamiento para que la pieza sea capaz de retener la geometría del molde al que se le somete la prueba.

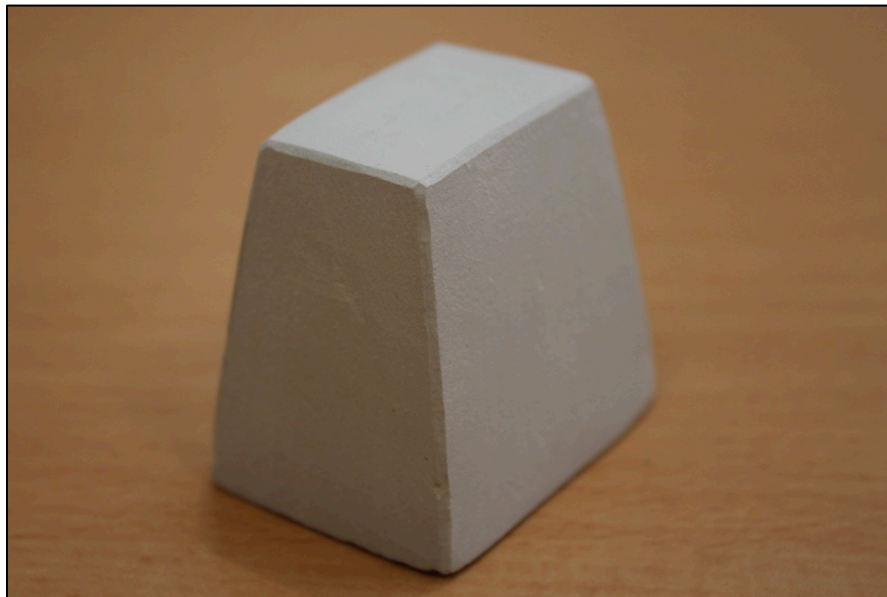
Se comienzan con trozos de un tamaño medio de arcilla y se forman a mano hasta que obtener una geometría con forma aproximada de cubo. Es

necesario dejar las piezas secar durante dos días aproximadamente para obtener buenas características de rigidez, de lo contrario podrían deformarse o romperse los moldes durante la parte de lijado.

Una vez se han endurecido lo suficiente los moldes es necesario medirlos y marcar las zonas que se desean desbastar con la lijadora para obtener la pieza final.

Se fabrican moldes con ángulos de inclinación de 0° , 5° , 10° y 15° respecto a la vertical. Varían también las alturas de todos entre 40, 50, 60 y uno de ellos 85 mm.

En la imagen a continuación se observa uno de los moldes de 10° de inclinación con los bordes desbastados para proporcionar un acabado de chaflan de aproximadamente $45^\circ \times 0.5$ mm.

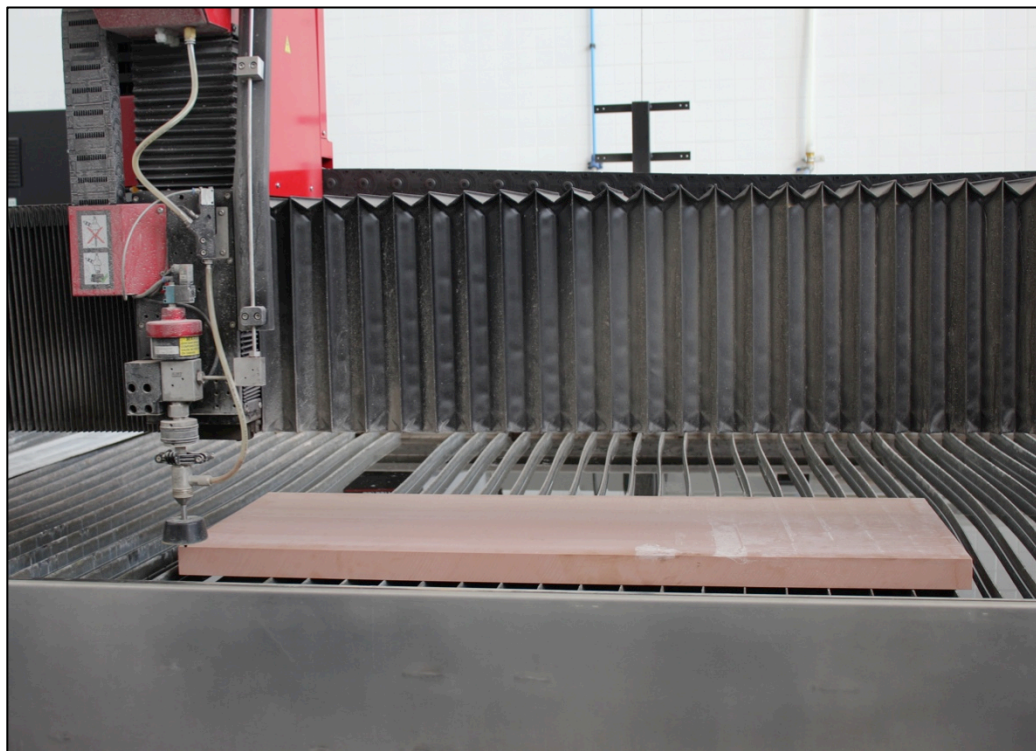
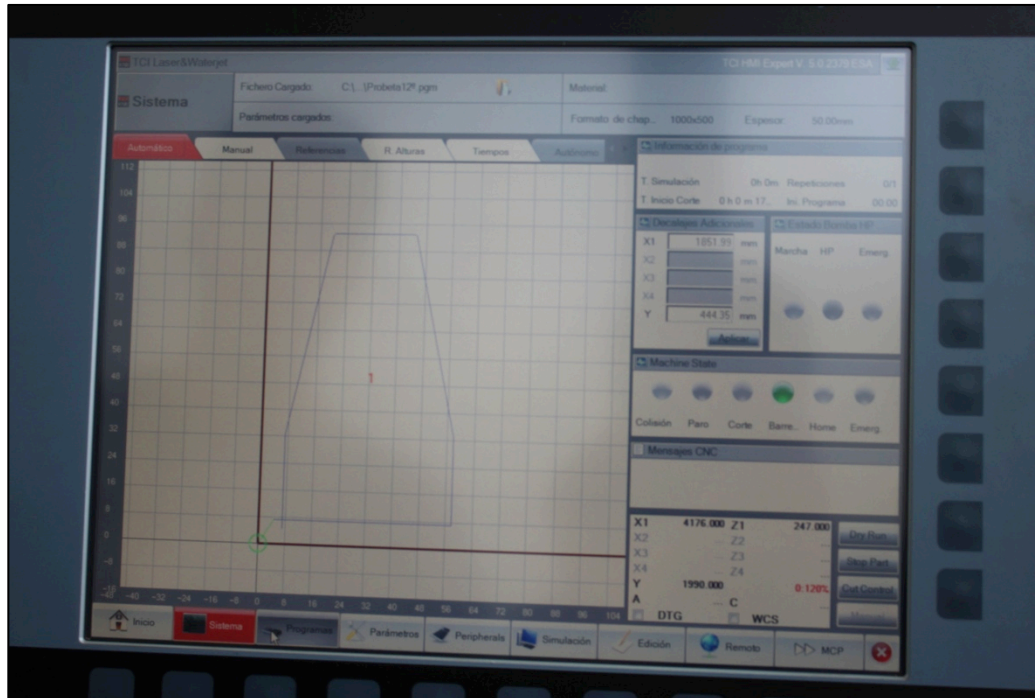


3.5.2.2 *Moldes hechos en ureol*

Es necesario previamente realizar un dibujo en CAD de la pieza que se desea obtener y generar un archivo DXF que crea una representación en 2D mediante vectores del perfil con la forma que se desea mecanizar.

Una vez se ha generado el código **Anexo X** se lleva al controlador de la máquina de corte y se procede a configurar los parámetros de la máquina para que se pueda realizar el mecanizado correctamente.

1. Se establece un punto de referencia de partida para que la máquina comience a trabajar.



2. Es necesario establecer correctamente en el sistema el tipo de material con el que se va a trabajar para que los valores de los parámetros de corte sean los óptimos y produzcan un mejor resultado. En este caso, el material Ureol no está previamente definido sin embargo, al ser un material con propiedades medianamente semejantes a aquellas de la madera, se escogió madera como el material de partida.
3. Por motivos de seguridad hasta que no se haya finalizado todo lo relacionado con el software y la puesta a punto de la máquina no es que se inician todos los elementos restantes de la máquina; vía de suministro de aire a presión, bomba.



4. Se procesa el programa de mecanizado y se ejecuta.

5. La máquina mantiene una posición de inicio durante 3 segundos para asegurar que el chorro abrasivo atraviesa el material que se va a cortar.



6. La máquina sigue la trayectoria establecida.



7. Se obtiene el corte de la pieza deseada. *Figura 3-8*

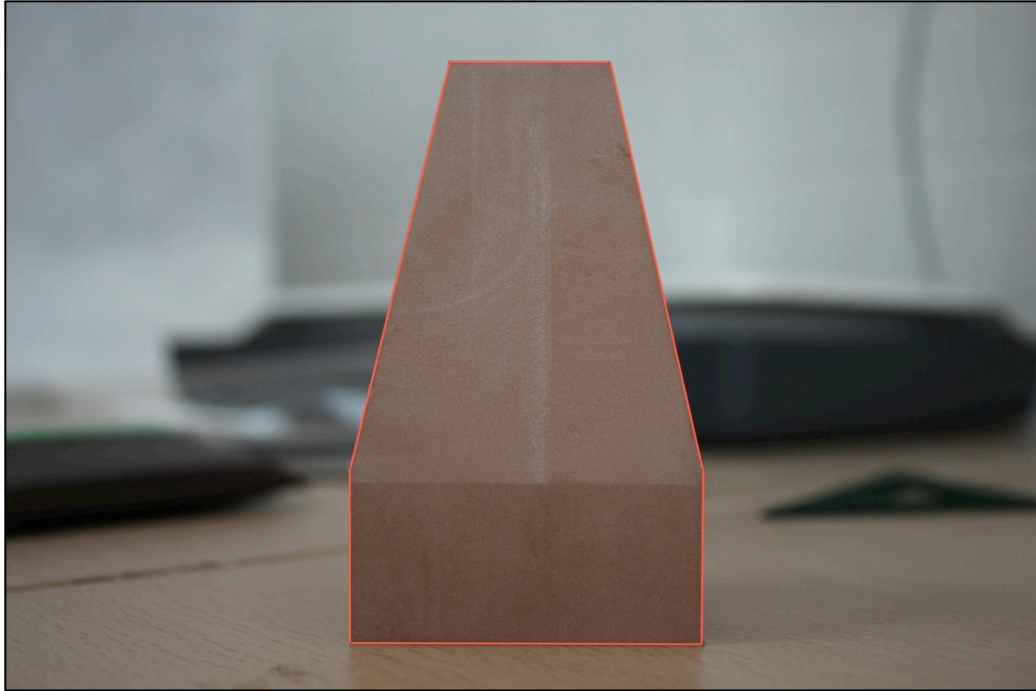


Figura 3-8. Pieza obtenida de corte por chorro de agua

Al existir ya una inclinación en dos de las caras laterales de la pieza resultante, es necesario medir y trazar una línea orientativa que facilite la colocación de la pieza en la orientación deseada en la máquina. Esto se hace para que el mecanizado sea lo más sencillo posible, un planeado manual. En este caso influye mucho el factor humano a la hora de colocar manualmente la pieza, se puede producir un error de décimas de milímetros que se acumule a lo largo del proceso de mecanizado y resulte en un defecto bastante mayor.

Se observa en la anterior *Figura 3-8* una zona que tiene perpendicularidad respecto a un plano horizontal, esto se deja intencionadamente para que se pueda sujetar bien la pieza en las mordazas de la máquina de control numérico.

La *Figura 3-9* muestra el método de colocación de la pieza en las mordazas de la máquina CNC.

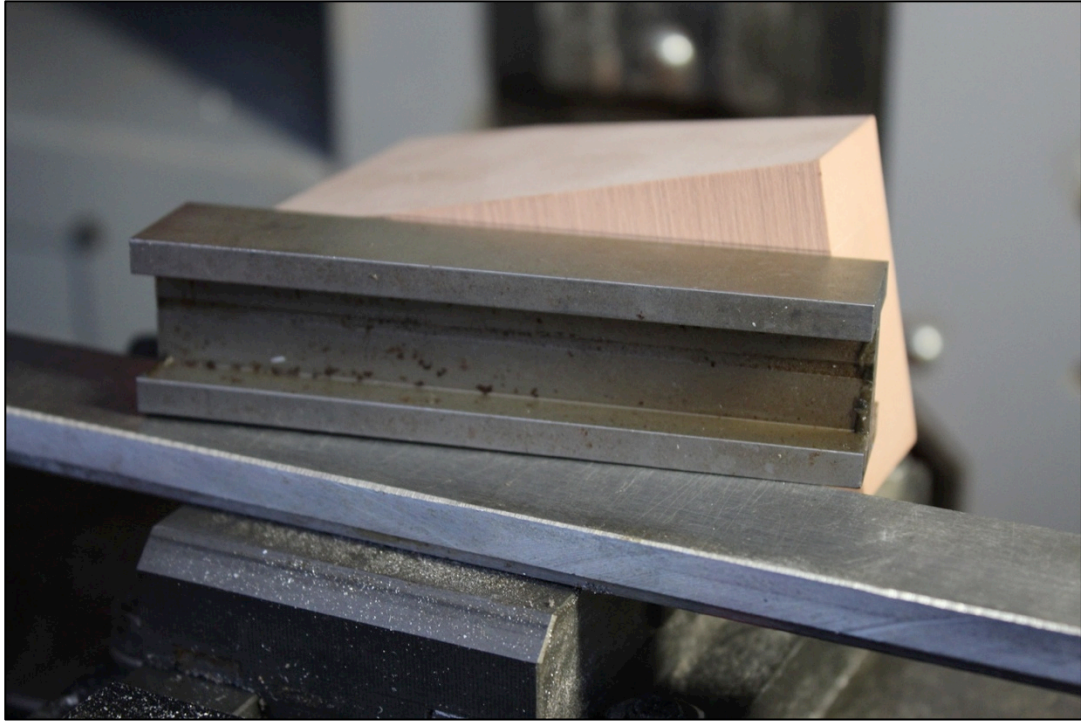
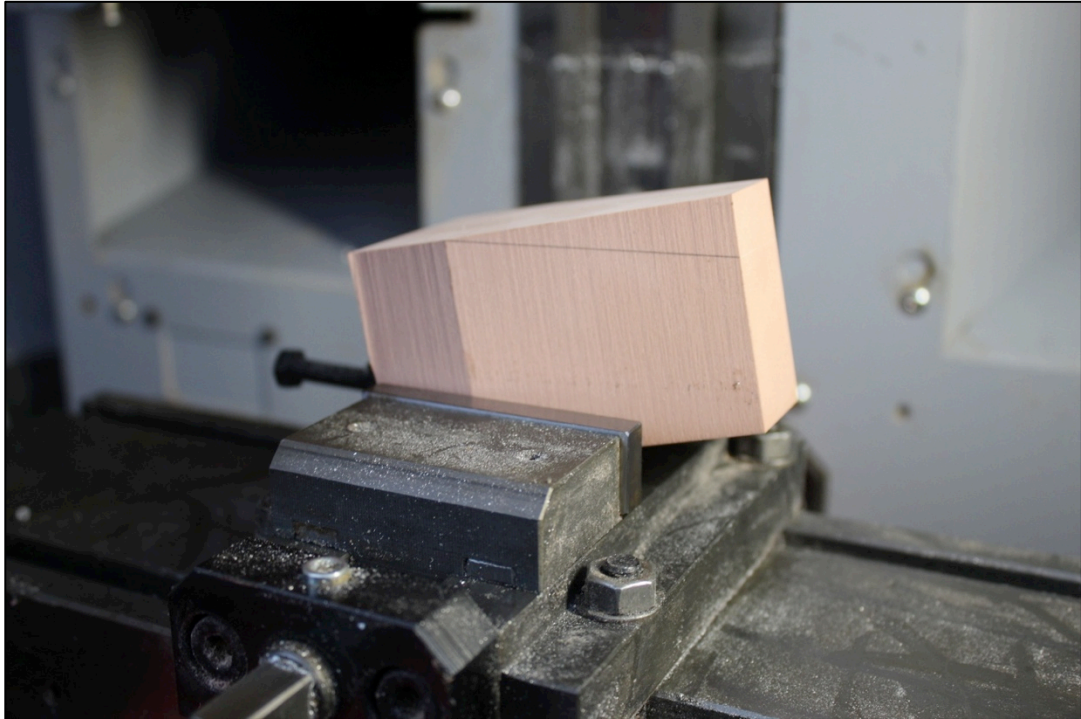


Figura 3-9



Se hace el decalaje de origen haciendo que la herramienta seleccionada roce la pieza que se desea mecanizar, *Figura 3-10* y se introduce los valores de la posición de la herramienta en el sistema.

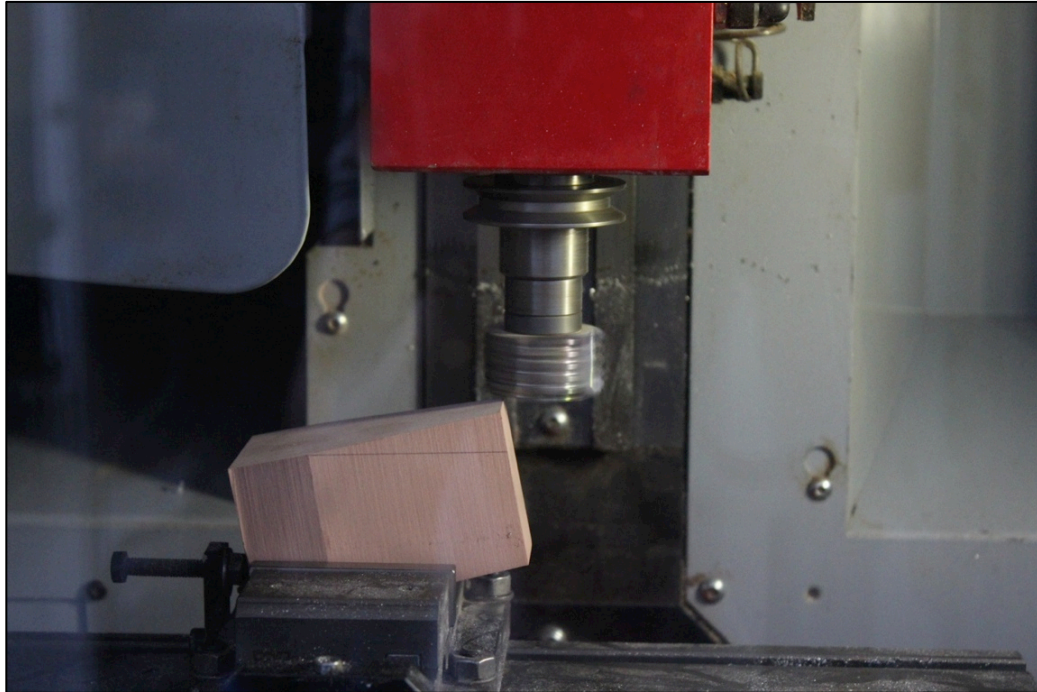


Figura 3-10



Es entonces que se genera el programa de mecanizado, que en este caso es muy reducido debido a que se hará un barrido de manera manual. Simplemente es necesario indicar la velocidad de giro de la herramienta y la distancia de profundidad en el eje Z con respecto al decalaje de origen que se desea mecanizar. Esta dimensión viene representada en la *Figura 3-11*

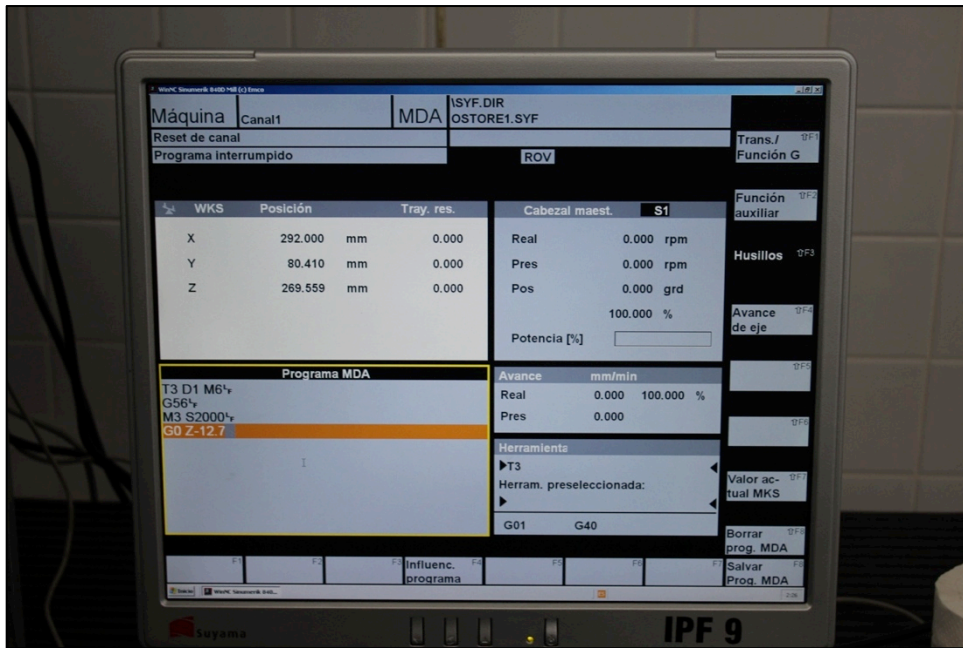
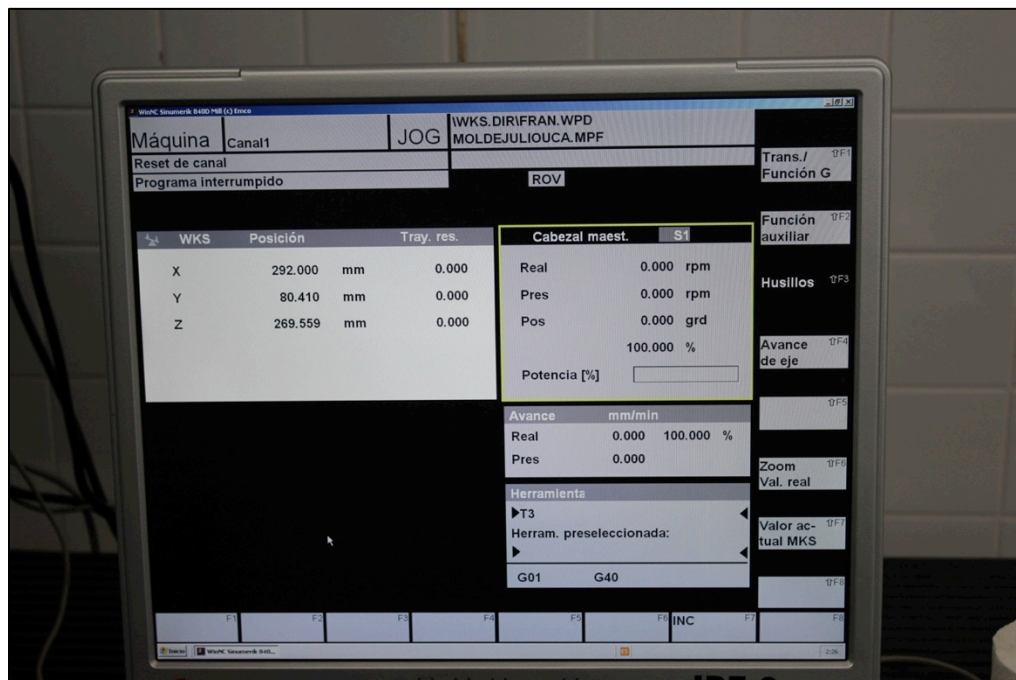


Figura 3-11



Se comienza el proceso de mecanizado. *Figura 3-12*

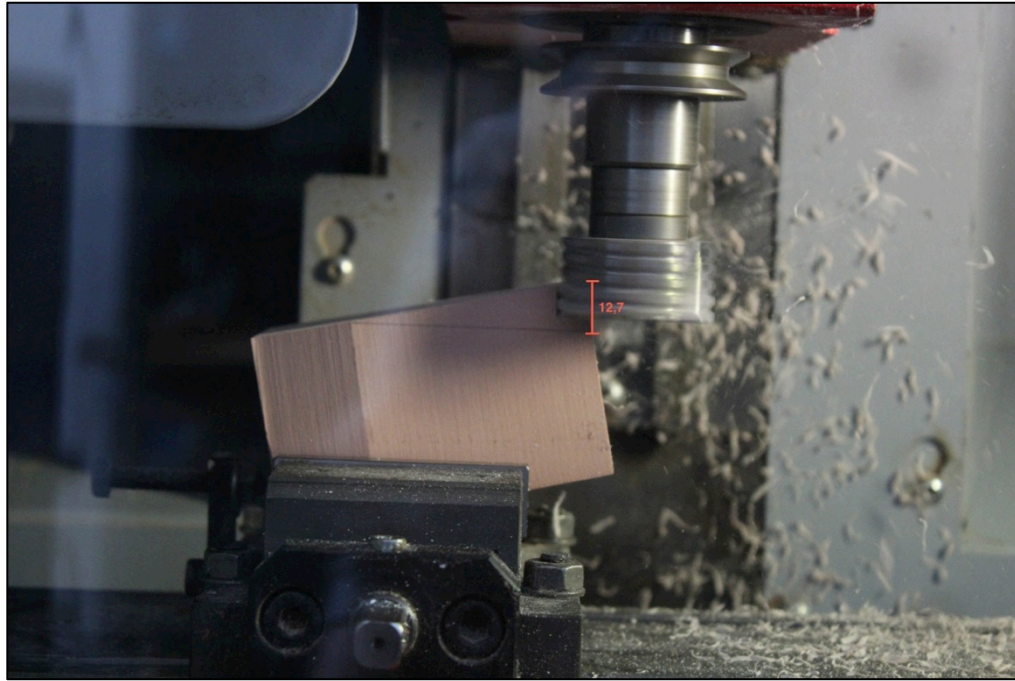


Figura 3-12

Por último, la pieza tiene un resultado como muestra la *Figura 3-13* y la *Figura 3-14*.



Figura 3-13

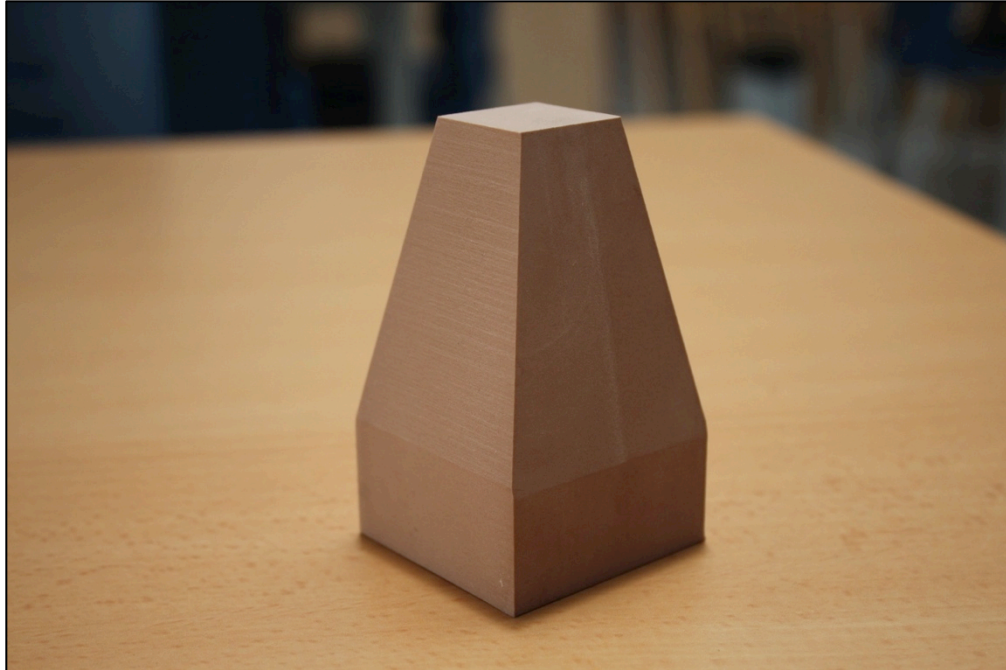
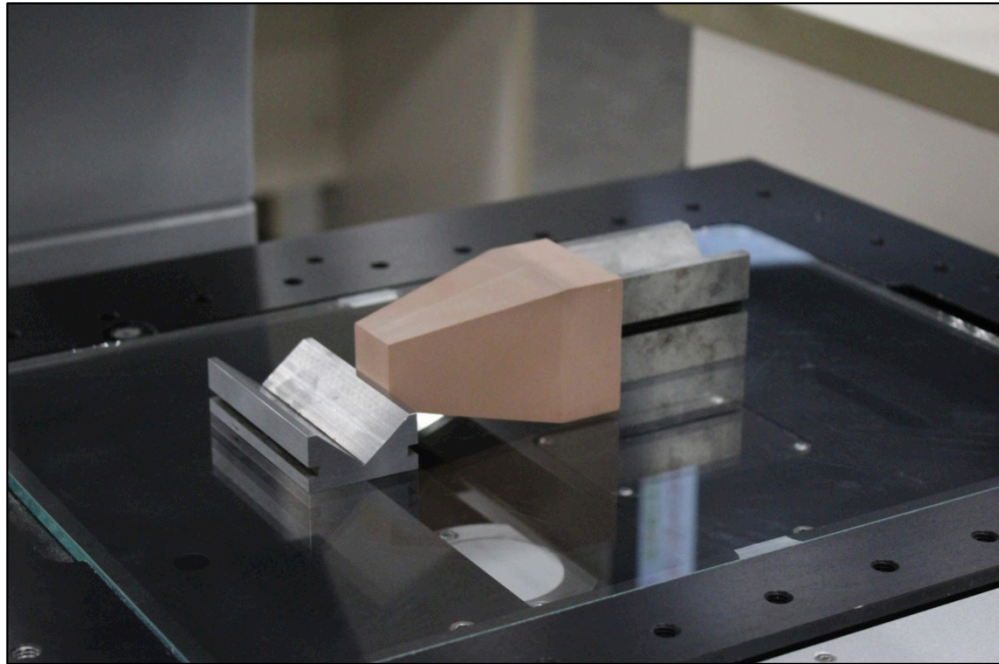
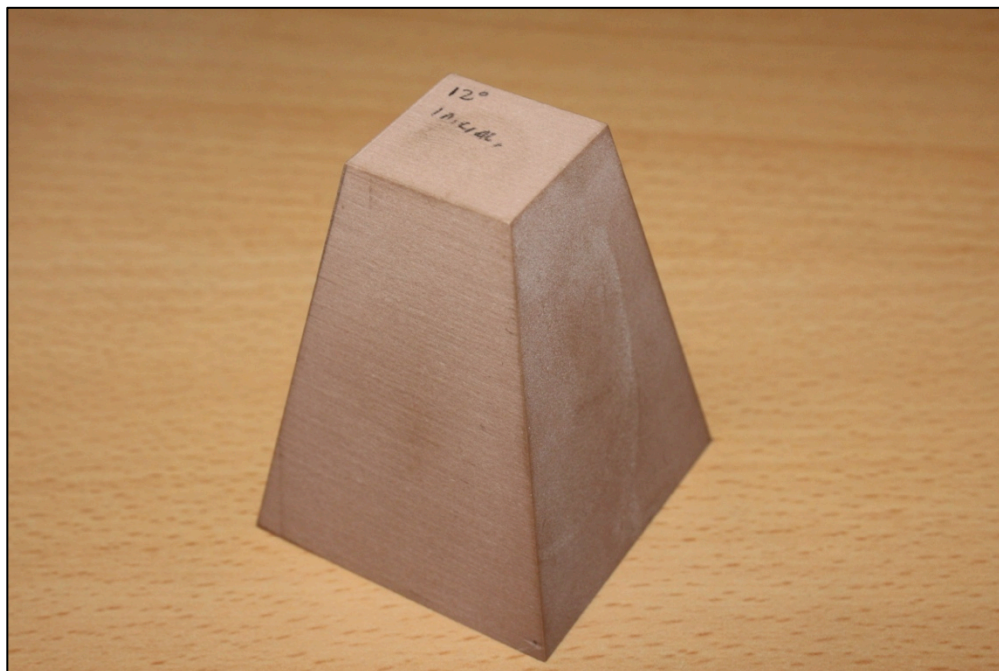


Figura 3-14

Con ayuda de un útil se consigue colocar la pieza que se desea medir en posición horizontal en la zona de visión de la máquina. La máquina de medida está conectada a un PC que reproduce a tiempo real la situación de la bandeja. El software de la máquina hace una medida mediante vectores que se asignan al contorno de la pieza a medir. Posteriormente se determina el ángulo que hay entre las caras que se han mecanizado y el plano horizontal de la pieza.



El material sobrante de la base se corta con una sierra y queda la pieza que se utiliza en los ensayos de termoconformado.



3.5.3 Realización de los ensayos

Para la realización de las pruebas de termoconformado es importante asegurarse que la máquina está en regla, es decir, conectada a la red eléctrica y que la bandeja está correctamente situada como en la *Figura 3-15*.

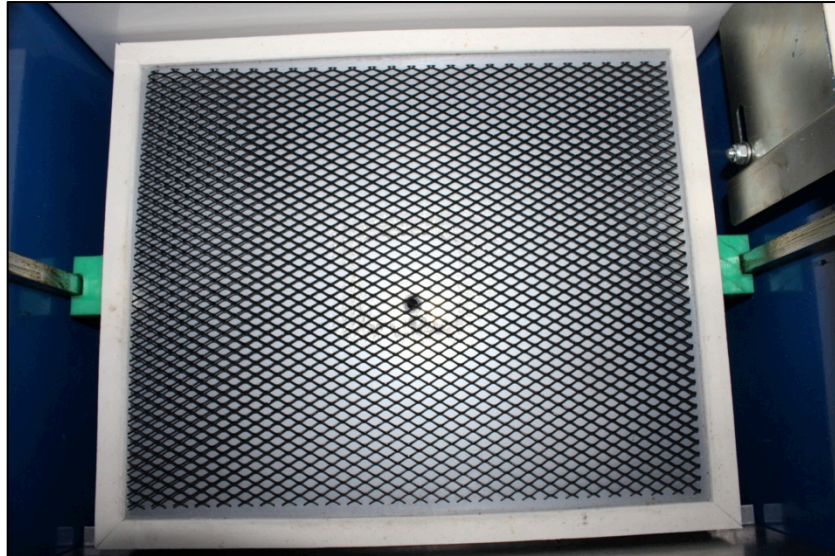
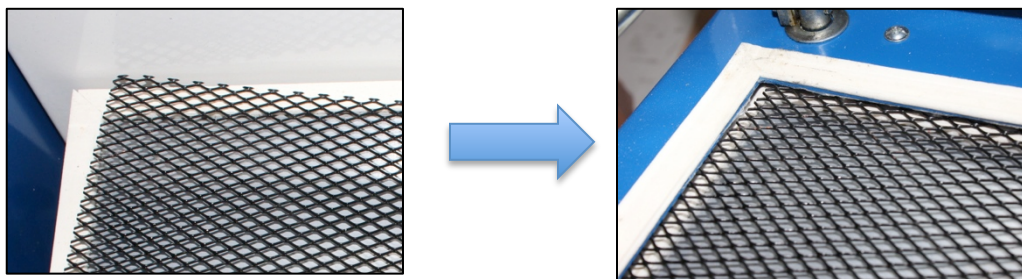


Figura 3-15

De lo contrario, si se coloca malamente como aparece en la siguiente imagen, no se crea la estanqueidad en el compartimento y es necesario desechar la prueba realiza.



3.5.3.1 *Ensayos realizados con moldes manuales*

Dentro de este apartado de ensayos se destacan tres tipos de pruebas distintas en una serie de 21 ensayos.

- Pruebas realizadas con moldes en solitario para determinar condiciones de temperatura de trabajo óptima, presión de vaciado óptima y comportamiento de liberación.
- Pruebas realizadas con dos moldes simultáneamente para comprobar la efectividad de pequeños atrapa-arrugas.
- Pruebas realizadas con plataformas elevadoras para estudiar el acabado superficial y liberación de las piezas.

Se trata de averiguar cuáles son los valores óptimos de los parámetros mencionados al principio del tema. Las pruebas que se realizan con estos moldes manuales utilizan el material HIPS que se trata del material principal de trabajo de este TFG. Las pruebas que se realizan posteriormente en PMMA y PE son complementarias y de muestreo. Esto se debe a la disponibilidad cronológica de los materiales.

- Pruebas con moldes solitarios

Según las características del material HIPS se tiene una temperatura de trabajo de 80°C. Acorde al estudio termográfico se corresponde con aproximadamente 40s de tiempo de exposición a la fuente de calor.

Los moldes de 0°, 5°, 10° y 15° se colocan por separado y se realizan pruebas de temperatura exponiendo el termoplástico a 40s, 38s, 36s y 34s.

En paralelo se estudia a su vez las presiones de vaciado variando entre el máximo permitido de -0.9, -0.8, -0.7 y -0.6 bar.

Estos dos parámetros, junto a la geometría de la pieza determinan si se podrá liberar o no el molde de la pieza final fabricada.

Esta serie de ensayos actúan de una primera toma de contacto con la máquina y su funcionamiento y abren paso a la siguiente serie de ensayos.

· Pruebas con dos moldes

Se realiza una serie de pruebas en los que ya no se varía el tiempo de exposición ni la presión de vaciado. Sin embargo sí que varía el contenido de la bandeja de moldeo. Es decir, se emplea el uso de pequeños atrapa-arrugas.

Las pruebas que se realizan son las siguientes:

Combinación de moldes de:	Tiempo de exposición a la fuente de calor	Presión de vaciado	Atrapa-arrugas
5° y 10°	34s	-0.7 bar	No
5° y 10°	34s	-0.7 bar	Cubos de 18mm
5° y 10°	34s	-0.7 bar	Cubos de 9mm
5° y 10°	34s	-0.7 bar	Cubos de 9mm

La disposición de las pruebas se muestran en las imágenes a continuación.

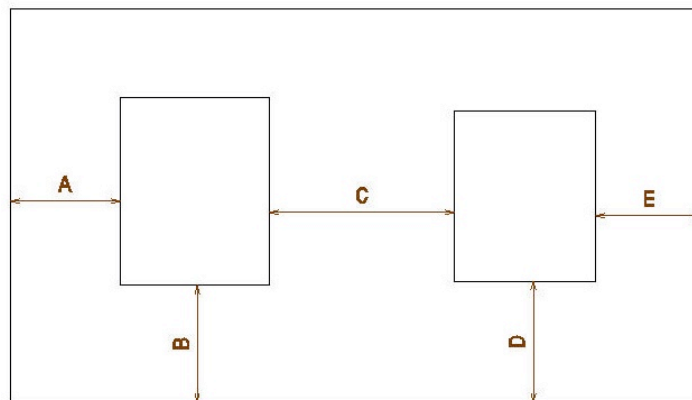


Figura 3-16. Disposición de moldes

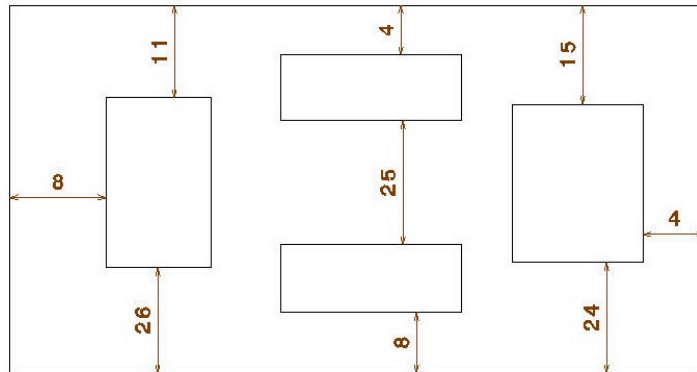


Figura 3-17. Disposición de moldes

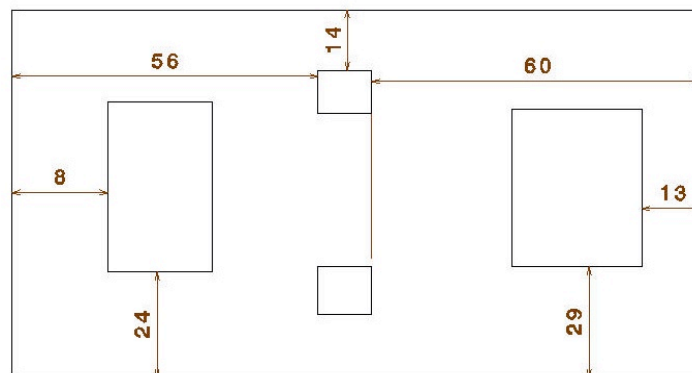


Figura 3-18. Disposición de moldes

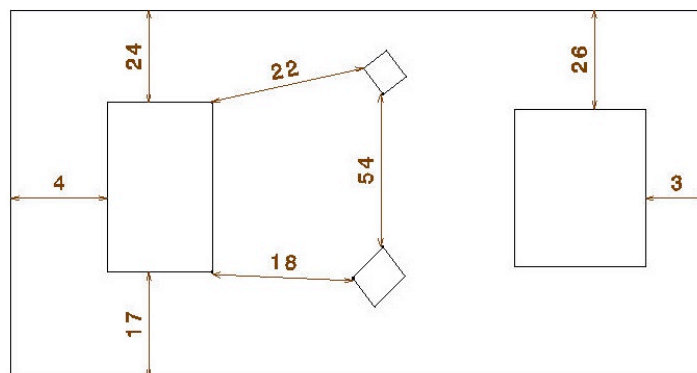


Figura 3-19. Disposición de moldes

· Pruebas realizadas con plataformas

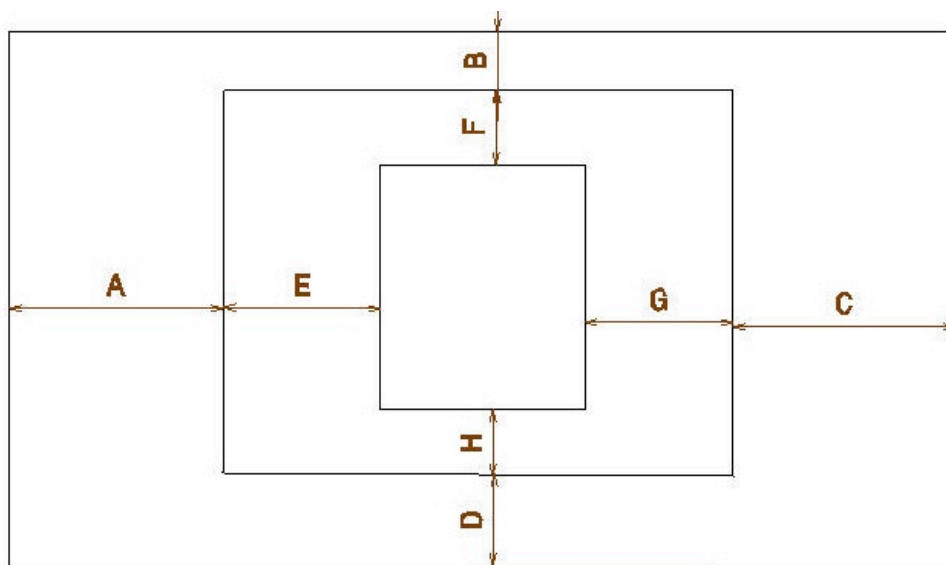
Según las fuentes bibliográficas consultadas para este TFG, colocar una pequeña plataforma que rodea el molde beneficia la liberación del molde y reduce la cantidad de arrugas formadas.

Para verificar el hecho, se realizan distintas pruebas con todos los moldes disponibles excepto el de 0° debido a que es imposible obtener un resultado favorable con esos parámetros de inclinación.

El tiempo expuesto de las láminas a la fuente de calor fue de 34s y una presión de vaciado de -0.7 bar.

Molde	Altura de plataforma	Distancia que sobresale de las paredes	Altura	Chaflanes
5°	9mm	10mm	40mm	No
10°	9mm	10mm	40mm	No
15°	9mm	10mm	40mm	No
5°	9mm	15mm	50mm	Si
10°	9mm	15mm	50mm	Si
15°	9mm	15mm	50mm	Si
10°	25mm	20mm	85mm	Si

Expuestas de tal manera como aparece en la figura a continuación



A continuación, la disposición de una de las pruebas que posteriormente se realizó.

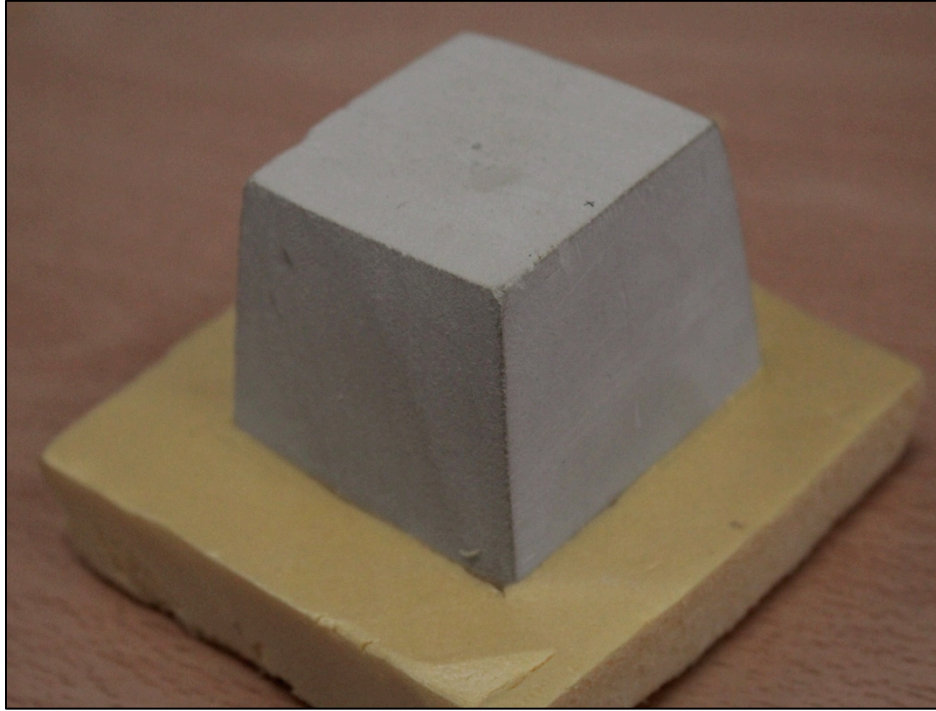


Figura 3-20. Molde con plataforma

Es de suma importancia no dejar ni un hueco entre el molde y la plataforma o se originarán roturas en el material termoplástico debido a la tensión producida por la presión de vaciado.

3.5.3.2 Ensayos realizados con moldes de control numérico

Se fabrican 16 moldes distintos con paredes de: 2°, 3°, 4°, 5°, 8°, 10°, 12° y 15° de inclinación. A continuación se muestran los moldes en las figuras.

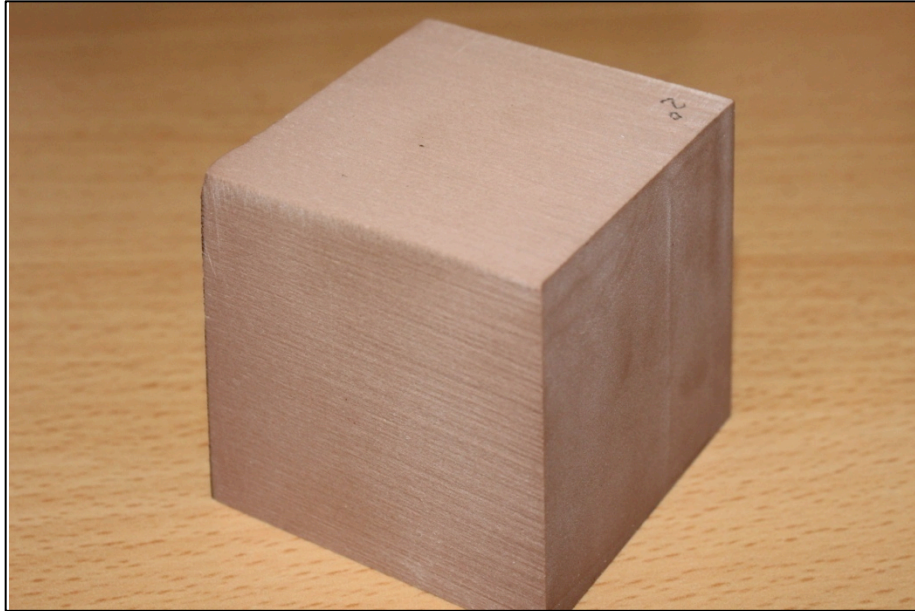


Figura 3-21 molde 2º

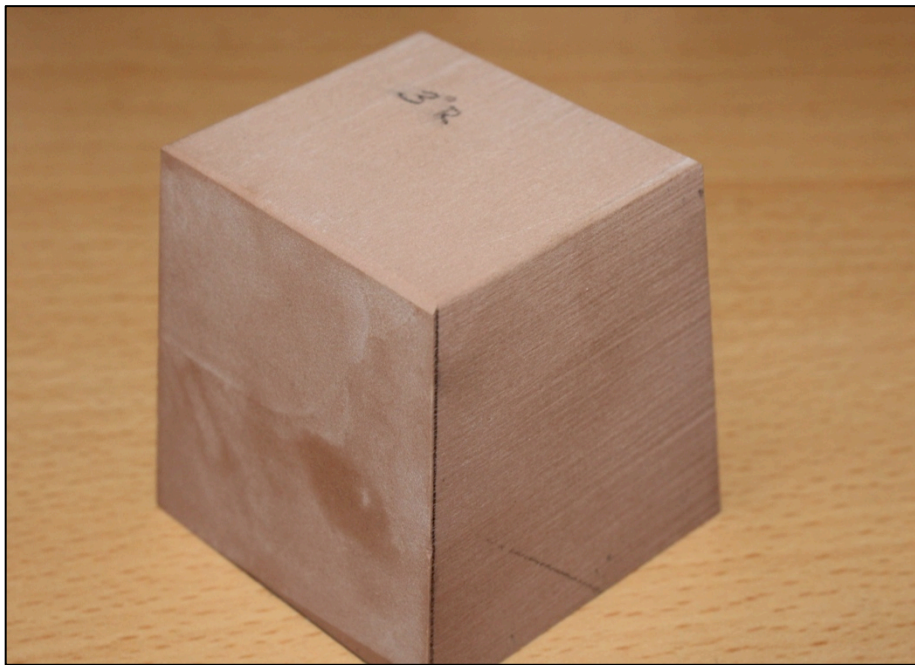


Figura 3-22 molde 3º

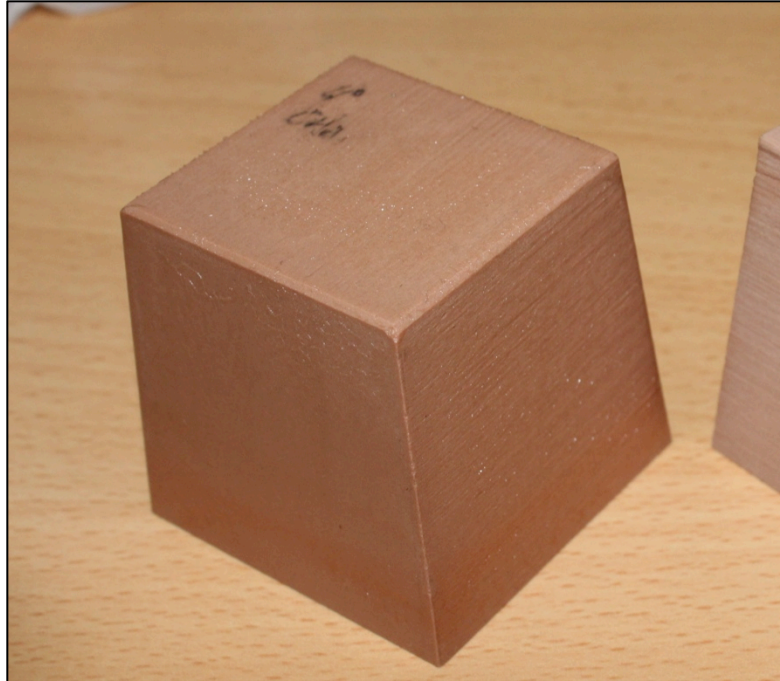


Figura 3-23 molde 4º

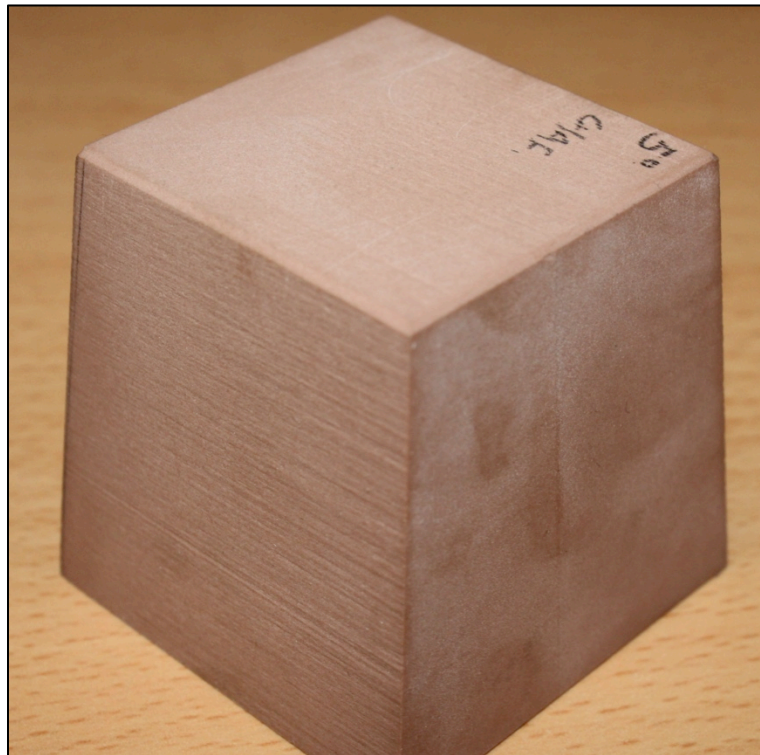


Figura 3-24 Molde 5º

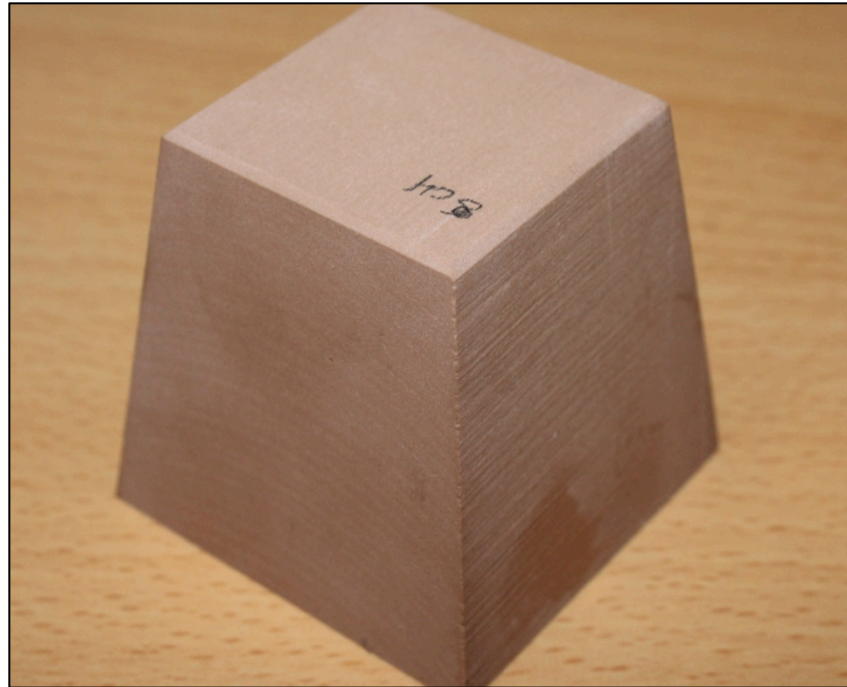


Figura 3-25 Molde 8°

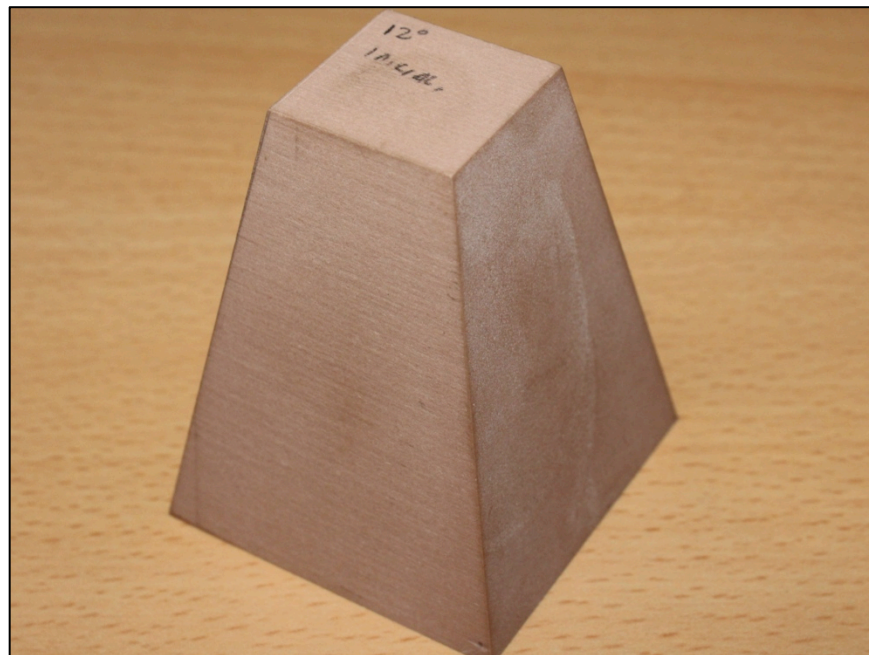


Figura 3-26. Molde 12°

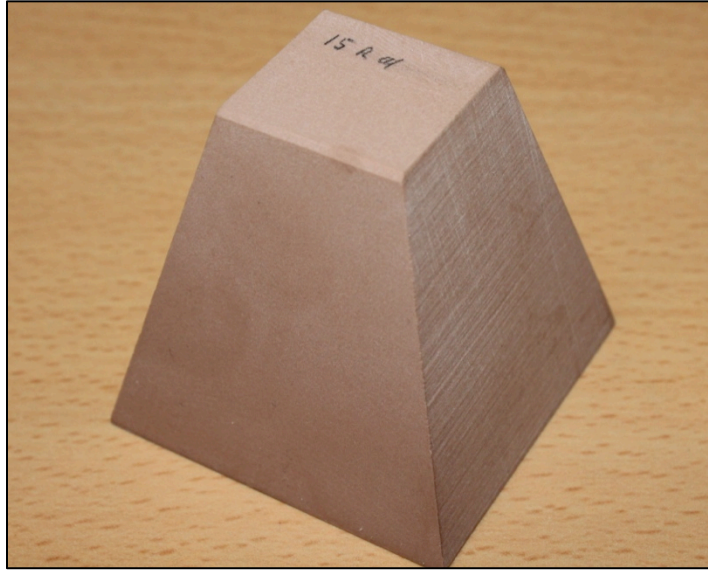


Figura 3-27 Molde 15º

Estaba previsto fabricar tres moldes de cada tipo, para estudiar la propagación del material termoplástico dependiendo del acabado que tuvieran los vértices de la cara superior. Sin embargo, debido a la falta de material se pasó a confeccionar dos moldes de cada tipo; uno con vértices acabados en filo y el otro una combinación de chaflán y radio de redondeo dos a dos. En la imagen a continuación se observa este acabado de distintos vértices en chaflán de $45^\circ \times 0.75\text{mm}$ y radio de redondeo $R=0.75\text{mm}$.

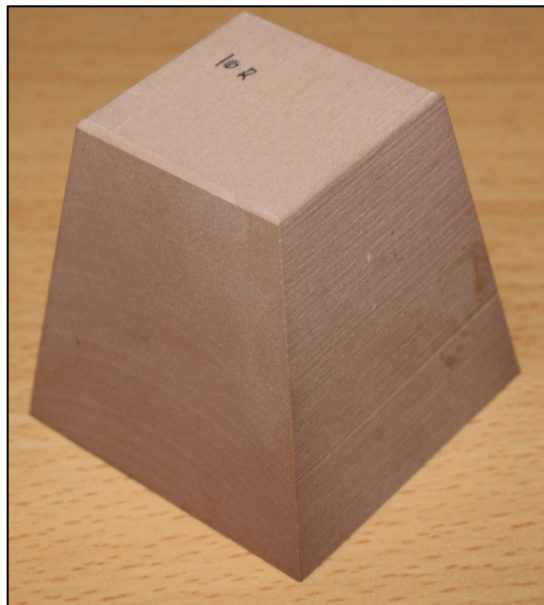


Figura 3-28 Molde 10º con chaflanes.

Los moldes cuentan con una altura de 50mm exceptuando uno de los moldes de 12° de inclinación que tiene una altura de 60mm. Éste último fue el elegido para realizar un muestreo de verificación y comprobar que la máquina cortadora por chorro de agua abrasivo y la máquina CNC aportaban acabado preciso a la pieza. A continuación se muestran los resultados del estudio que se llevó a cabo con la máquina de medida por visión.

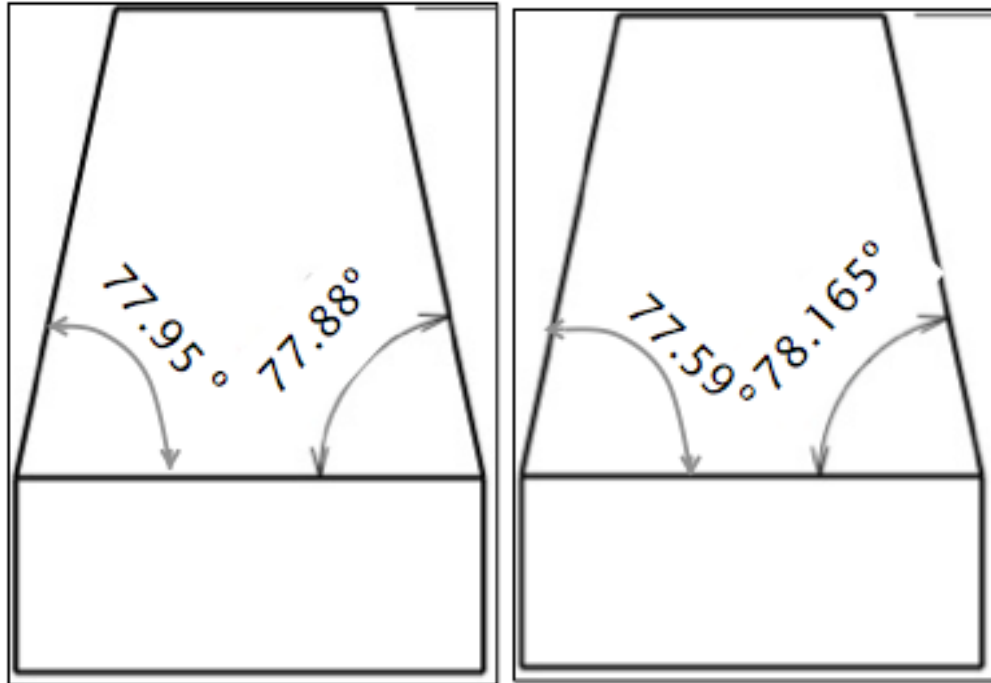


Figura 3-29. Resultados del muestreo de ángulos de inclinación

La imagen de la izquierda muestra los valores de los ángulos respecto a la horizontal de las caras que fueron cortadas con la máquina de corte por chorro de agua. Son algo más precisos que los resultados de la imagen de la derecha, realizada por la máquina de control numérico de 3 ejes.

Igualmente, se muestra que el método de corte es muy preciso en ambos casos, siendo el valor interesado a obtener 78° de inclinación.

Se realizaron 5 serie de ensayos distintos con estos moldes:

1. Una primera serie de ensayos con cada molde lubricado con vaselina para intentar favorecer la liberación del termoplástico tras el ensayo de termoconformado utilizando el material base HIPS

2. Una segunda serie de ensayos con cada molde seco, de nuevo utilizando el mismo material base HIPS de 1.5mm de grosor.
3. La tercera serie de ensayos utilizando el material PE. Se previó realizar los ensayos con varios moldes pero con la realización de dos pruebas fue suficiente para llegar a unas conclusiones sólidas.
4. La cuarta serie de pruebas se realizó con PMMA de 3mm de grosor.
5. En la última serie de pruebas se utiliza el material base HIPS de 1mm de grosor pero se reducen el número de moldes que se utiliza hasta conseguir un ensayo óptimo.

En el capítulo de *Resultados y Discusiones* se muestra la colocación de los moldes en la bandeja de trabajo. De acuerdo con la siguiente imagen.

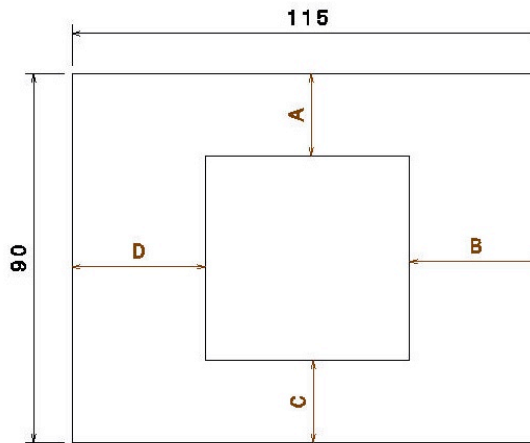


Figura 3-30. Disposición de moldes

1. Para la realización de estas pruebas es necesario previamente lubricar el molde a utilizar y situarlo céntrico en el hueco de la zona de la ventana termoconformadora. Los parámetros fijos son los tiempos de exposición de 34s y la presión de vacío de -0.7 bar. El tiempo de enfriamiento para este material es fijo de mínimo 20s. A continuación se muestra un ejemplo de un ensayo de esta categoría realizado.

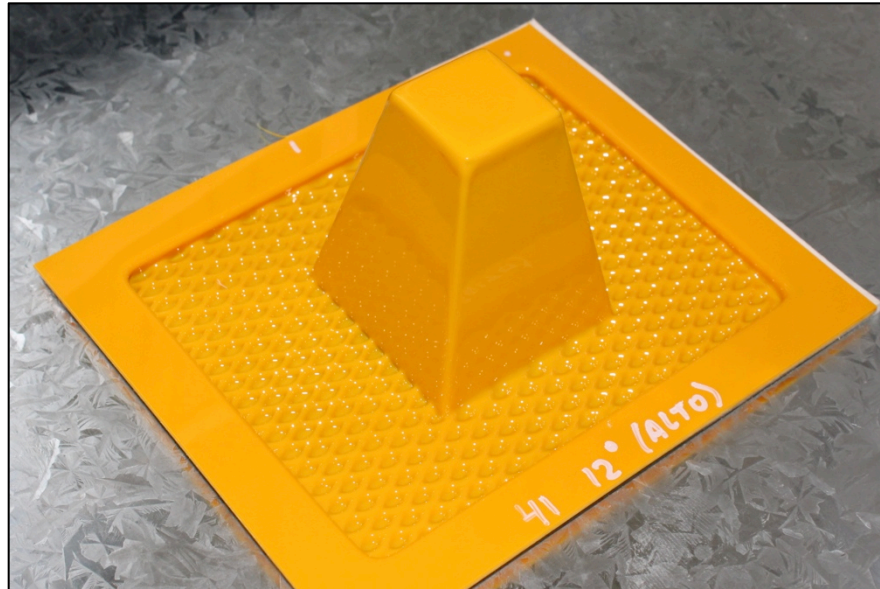


Figura 3-31

2. Esta segunda serie de pruebas es análoga a la anterior con la diferencia de estar los moldes sin lubricación.
3. Una vez se dispuso del PE se procedió a cortarlo en pequeñas láminas reducidas. Tan solo se realizan dos pruebas con moldes de 8° y 15° de inclinación en sus paredes laterales. Fueron suficientes ensayos para llegar a una conclusión viable. Para la prueba el fabricante recomienda un tiempo de aproximadamente 150s de exposición para el material en cuestión y espesor. Sin embargo, en la práctica la prueba se llevó de otra manera.

La presión de vaciado utilizada fue la máxima permisible por tratarse de un material bastante más resistente en comparación con aquél utilizado en las anteriores pruebas. Al realizar la prueba los moldes están lubricados para intentar favorecer la liberación.

A continuación una imagen representativa de uno de los ensayos.

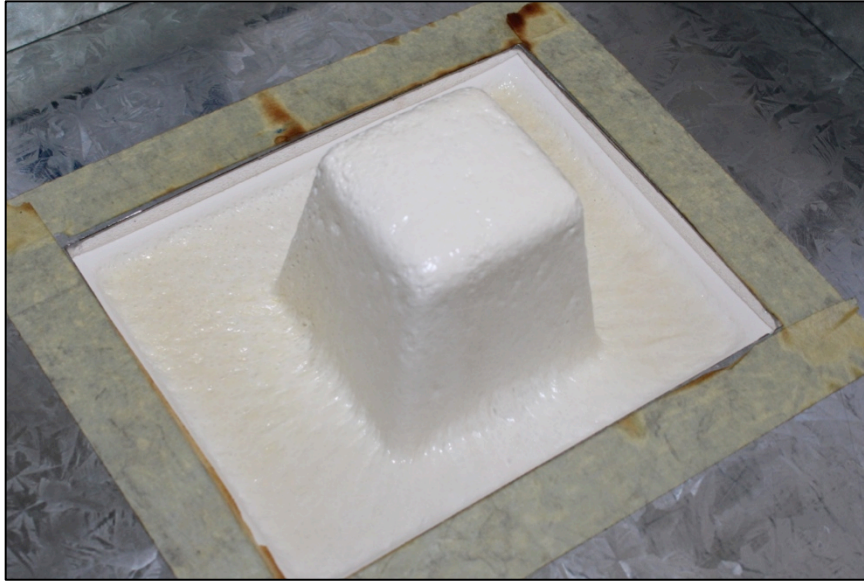


Figura 3-32

4. Pruebas con PMMA. Se trata de un material extremadamente duro y frágil, a pesar de ello es teóricamente apropiado para el termoconformado. Tiene una temperatura de transición a forma maleable de aproximadamente 155°C . Por lo que se prepara el primer ensayo con aproximadamente 130s de exposición a la fuente de calor. De nuevo, en la práctica se observan cambios inesperados que hacen que este tiempo cambie. Los moldes están lubricados en exceso, la presión de vaciado que se utiliza es la máxima permisible, debido al grosor del material y se deja un tiempo de enfriamiento de aproximadamente 40s. Este tiempo en la práctica también se ve alterado. Las imágenes siguientes muestran cómo avanza el proceso de termoconformado de una lámina de PMMA. Debido a las apreciables deformaciones resulta necesario disminuir el tiempo de calentamiento del material.

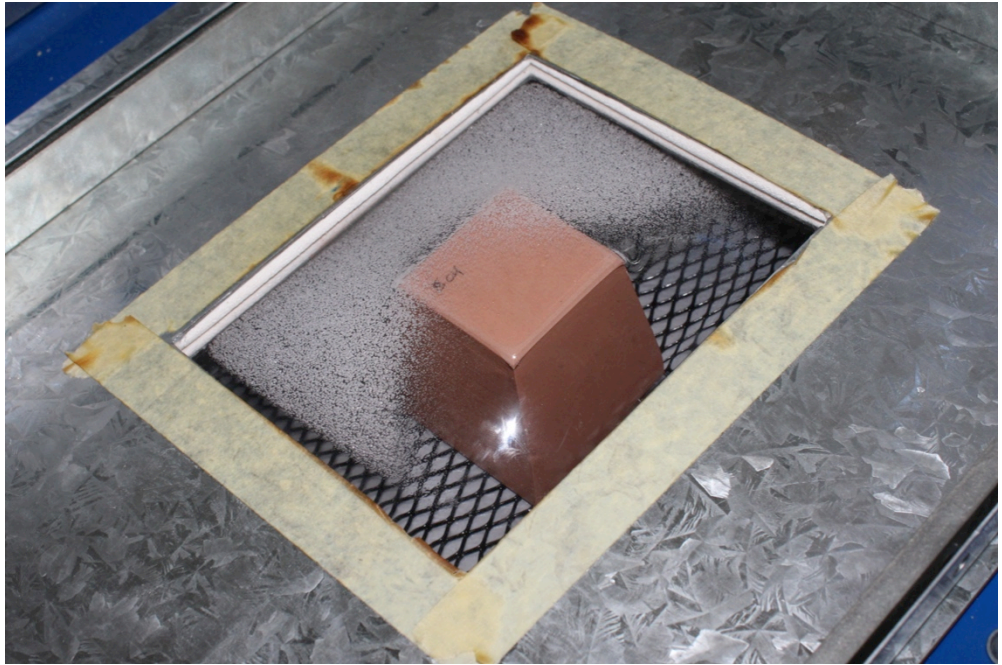


Figura 3-33 Termoconformado con PMMA

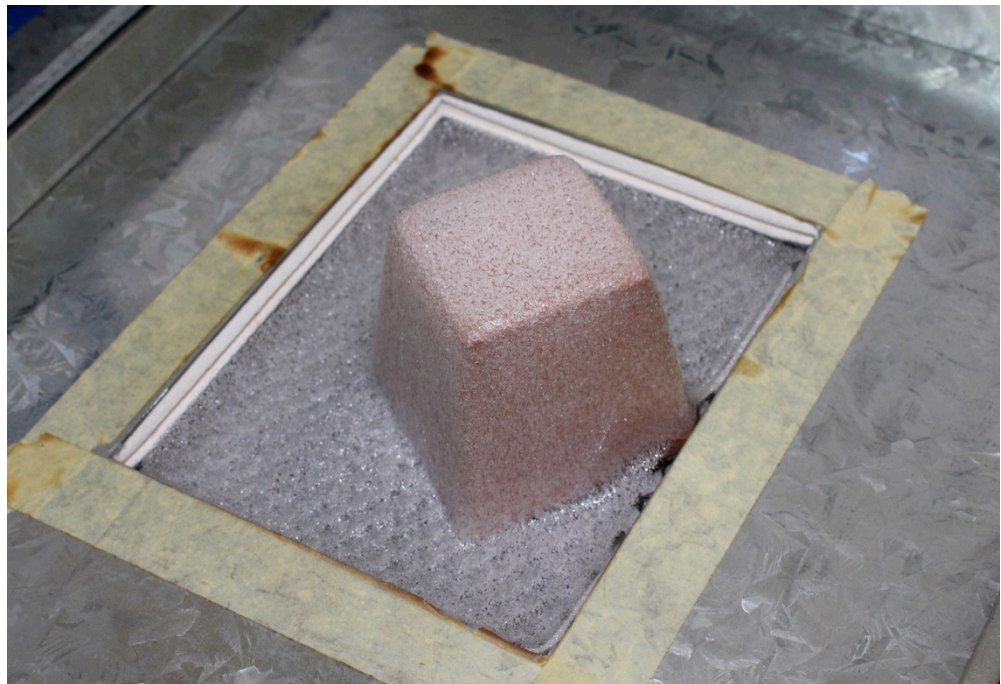


Figura 3-34 Pieza en PMMA

5. La última serie de pruebas se realiza con el material HIPS de 1mm de grosor de la siguiente manera:

Molde	Tiempo de exposición al calor	Lubricación	Tiempo de enfriamiento	Presión de vaciado
2°	25s	Sí	<20s	-0.7bar
3°	25s	Sí	<20s	-0.6bar
4°	25s	Sí	<20s	-0.6bar
5°	25s	No	<20s	-0.6bar
5°	25s	Sí	<20s	-0.6bar
8	25s	No	<20s	-0.6bar
10°	25s	No	<20	-0.6bar

Como se trata del mismo material que la primera serie de ensayos con estos moldes, no es necesario hacer un estudio tan exhaustivo para determinar qué ensayos resultarán más favorables.

3.5.4 Estudio cualitativo y cuantitativo de los ensayos

3.5.4.1 Análisis cualitativo

Una vez se realizan todas las pruebas se comienza el estudio de cada ensayo realizado. Para ello es necesario realizar un análisis cualitativo para destacar cualquier deformación que se produce. Este análisis proporciona información a nivel visual de:

- Formación de arrugas
- Irregularidades macroscópicas en la uniformidad del espesor del material estirado
- Rigidez y consistencia de la probeta

En el ejemplo expuesto a continuación se aprecia a simple vista una serie de deformaciones en la base de un ensayo debido a la poca resistencia del material elegido para crear la plataforma.

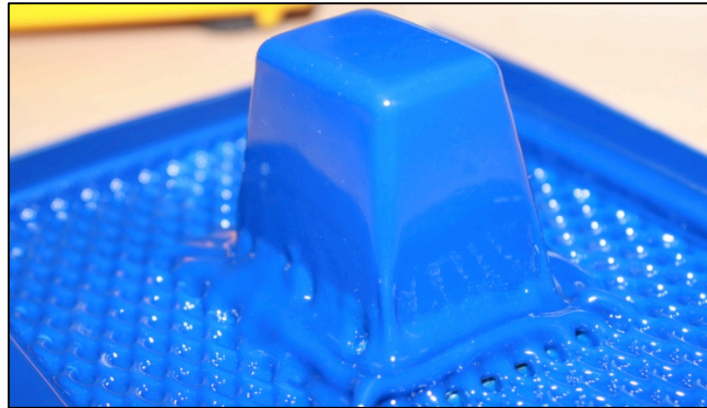
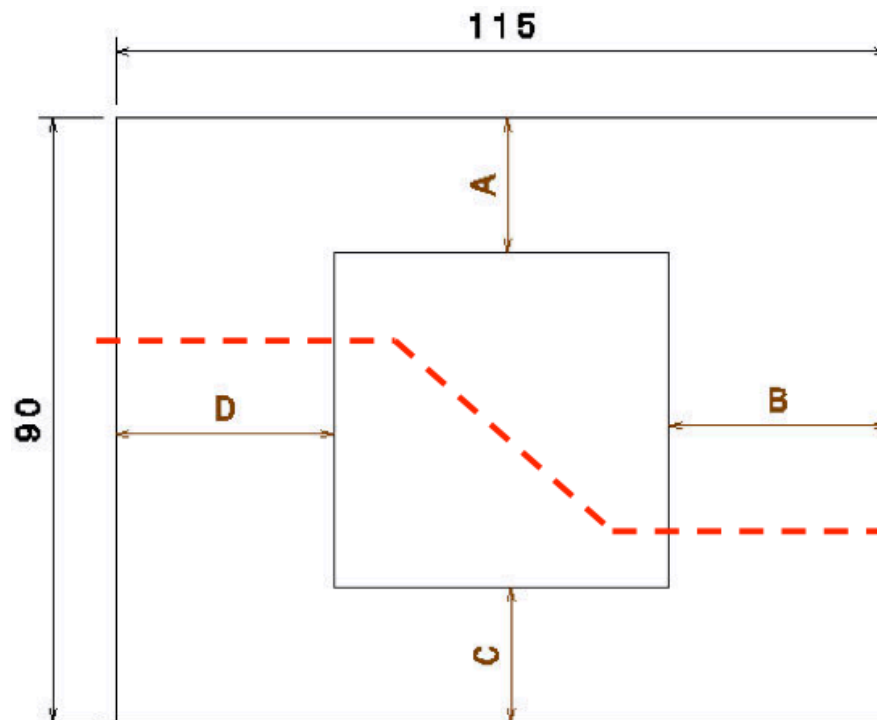


Figura 3-35.

3.5.4.2 Análisis cuantitativo

Este análisis es estrictamente posterior al cualitativo por la necesidad de destruir la pieza resultante. Se corta de manera transversal a lo largo del eje más largo como se muestra en la figura X. Para que queden expuestas todas las paredes laterales de la pieza. Para realizar las medidas se utiliza un micrómetro digital.



Las medidas se realizaron desde el punto más alto de la pared lateral hacia la base de la pieza cada 5mm. Un ejemplo de esto se observa en la siguiente imagen X.

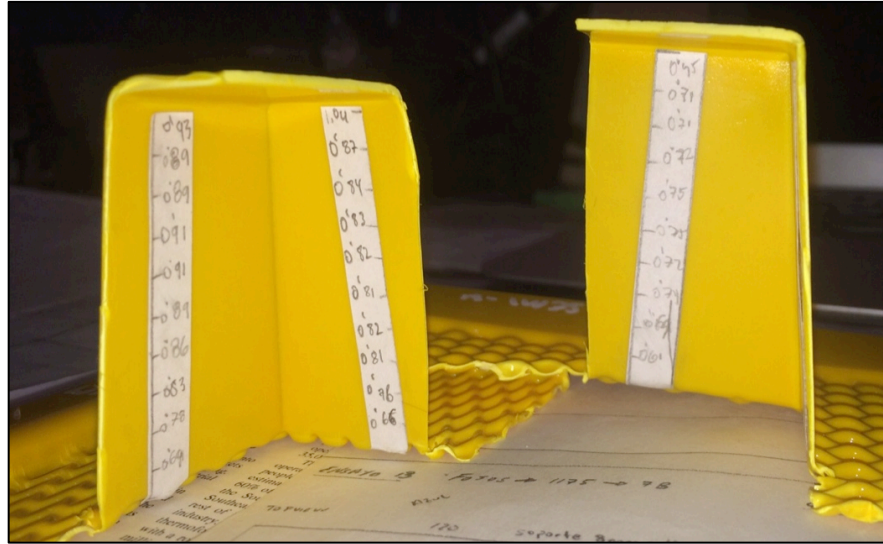
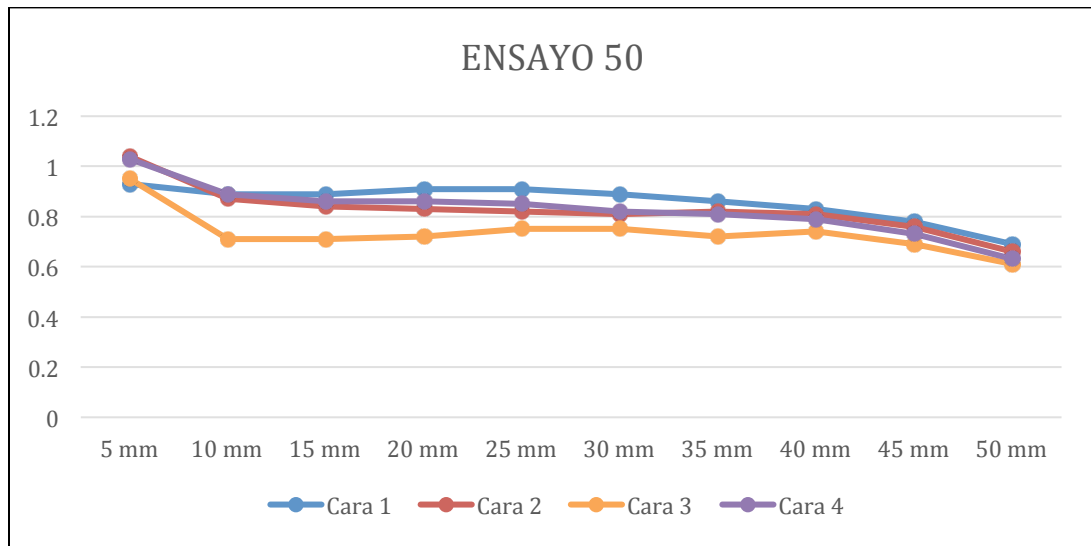


Figura 3-36. Muestra del estudio de grosores.

Es necesario digitalizar esos resultados para crear una serie de gráficos que mostrarán tendencias e irregularidades en las piezas. A continuación están los resultados obtenidos de la muestra anterior.

		10° Vértices acabados en R=0.75[mm]			
		A	B	C	D
Ensayo 50		23	35.5	19.5	32
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
		0.93	1.04	0.95	1.03
		0.89	0.87	0.71	0.89
		0.89	0.84	0.71	0.86
		0.91	0.83	0.72	0.86
		0.91	0.82	0.75	0.85
		0.89	0.81	0.75	0.82
		0.86	0.82	0.72	0.81
		0.83	0.81	0.74	0.79
		0.78	0.76	0.69	0.73
		0.69	0.66	0.61	0.63

Su respectiva gráfica de tendencias.



En el ejemplo se puede interpretar que hay una tendencia a mantenerse de igual grosor todas las paredes exceptuando la *cara 3*. Es observable que se produce un escalonamiento pasado los primeros 10mm de la cara que se puede deber a un enfriamiento repentino de la zona.

4 CAPÍTULO IV. RESULTADOS

4.1 Introducción

En este apartado se muestran los resultados de manera cualitativa y cuantitativa de los distintos ensayos. Los ensayos con moldes de arcilla se han realizado en HIPS de 1.5mm de espesor y una prueba con PE de 3mm de espesor atendiendo a la disposición mencionada en el método experimental de:

- Molde solo
- Dos moldes con atrapa-arrugas
- Molde con plataforma

Los ensayos realizados con moldes de ureol se realizan en HIPS de 1mm de grosor y 1.5mm de grosor, PE de 3mm de grosor y, por último, en PMMA de 3mm de grosor.

4.2 Organización de los resultados obtenidos

Como se ha mencionado anteriormente, los resultados están descritos de dos maneras por cada ensayo realizado. Un ensayo cualitativo y otro cuantitativo.

Los resultados cualitativos son una simple explicación de las observaciones que se hacen al obtener la pieza final, ya sea deformaciones, cúmulos o falta de material en zonas, si existe liberación inmediata o no sin tener que destruir la pieza o bien, si se ha lubricado el molde o no y como influye en el resultado.

En cambio, los resultados cuantitativos vienen recopilados en una tabla ensayo por ensayo. Los valores que se expresan son los valores del espesor de cada cara lateral en cada ensayo cada 5mm desde el punto más alto hasta el punto más bajo. Esos datos son posteriormente representados en un gráfico para su más sencilla interpretación.

Lo que se consigue con la representación de estos resultados es una muestra gráfica de cómo varía el espesor tras realizar el proceso de termoconformado. En otras palabras, se harán observable las zonas que sufren deformaciones

por enfriamientos repentinos del material al ponerse en contacto directo con el molde o por otros factores, como la fase de vaciado.

En este capítulo se expondrán los resultados de los ensayos más destacables. El resto de los ensayos se encuentran en el apartado de anexos XX.

Cada ensayo que se describa seguirá el formato de una lista a rellenar que expondrá las condiciones del ensayo de la siguiente manera:

1. Tipo de molde, β y h.
2. Tiempo de calentamiento
3. Material
4. Acabado de vértices
5. Liberación
6. Presión de vaciado
7. Tiempo de enfriado

4.3 Resultados de los ensayos con moldes de arcilla

4.3.1 Resultados de ensayos con molde en solitario

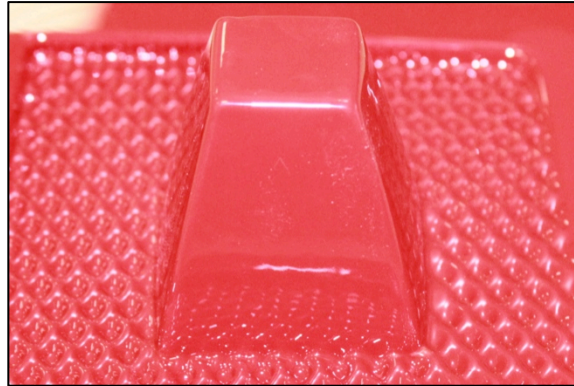
En este primer apartado al tratarse de pocos ensayos por ser aquellos que determinaban los valores óptimos de trabajo de la máquina, se muestran todos con sus respectivos resultados.

4.3.1.1 *Ensayo 1*

1. $\beta=15^\circ/h=40\text{mm}$
2. 38s
3. HIPS 1.5mm
4. Vivos/afilados
5. No inmediata/con rotura
6. -0.8bar
7. 30s

Resultados cualitativos.

Es un ensayo destacable por los resultados favorables que se obtuvieron. A simple vista se puede observar que se produjo una pieza resultante con un buen acabado superficial con bastante uniformidad en la totalidad del grosor en las paredes de la pieza. Sin embargo, cerca de la base se producen algunas imperfecciones por culpa de la rejilla, el material es succionado por los huecos dando lugar a irregularidades.



Resultados cuantitativos.

		15°			
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
1	5 mm	1.15	1.05	1	1.05
	10 mm	1	0.85	0.85	1
	15 mm	0.9	0.85	0.85	0.95
	20 mm	0.9	0.85	0.95	0.95
	25 mm	0.8	0.85	0.95	0.95
	30 mm	0.75	0.85	0.95	0.95
	35 mm	0.75	0.8	0.9	0.95
	40 mm	0.7	0.75	0.85	0.9
	45 mm	0.65	0.7	0.7	0.75

Se puede ver que todas las caras mantienen de manera favorable el grosor a lo largo de la longitud completa de la pieza.

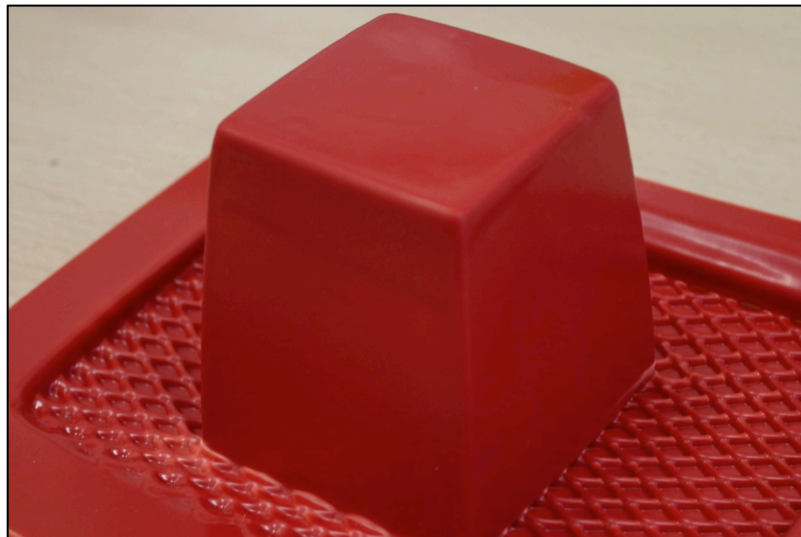
4.3.1.2 Ensayo 2

1. $\beta=5^\circ/h=65\text{mm}$
2. 38s
3. HIPS 1.5mm
4. Vivos/afilados
5. No inmediata/con rotura
6. -0.8bar
7. 30s

Resultados cualitativos

La pieza no presenta características de rigidez comparables con las piezas de menor altura. Cuando se intenta liberar la pieza del molde, se producen roturas en las bases de los vértices laterales. Esto ocurre por la menor cantidad de rigidez que tienen al tratarse de un molde de más altura.

Aparece una tendencia a que haya saltos o variaciones bruscas de grosor en aquellas caras que están más próximas a los límites del marco de la ventana reductora. En concreto, la cara número 3 presenta un salto notable que se puede observar en la imagen a continuación.



Resultados cuantitativos

		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
2	5 mm	0.95	1.05	0.9	0.95
	10 mm	0.8	0.7	0.75	0.8
	15 mm	0.8	0.7	0.7	0.8
	20 mm	0.75	0.65	0.45	0.8
	25 mm	0.7	0.65	0.35	0.7
	30 mm	0.7	0.65	0.35	0.7
	35 mm	0.65	0.65	0.35	0.7
	40 mm	0.65	0.65	0.35	0.65
	45 mm	0.6	0.6	0.35	0.65
	50 mm	0.6	0.55	0.3	0.6
	55 mm	0.55	0.45	0.25	0.45
	60 mm	0.4	0.35	0.25	0.35
	65 mm	0.3	0.2	0.15	0.15

Se observa que los valores del espesor de las caras laterales no son tan constantes ni similares entre sí como en el caso del ensayo 1.

4.3.1.3 Ensayo 3

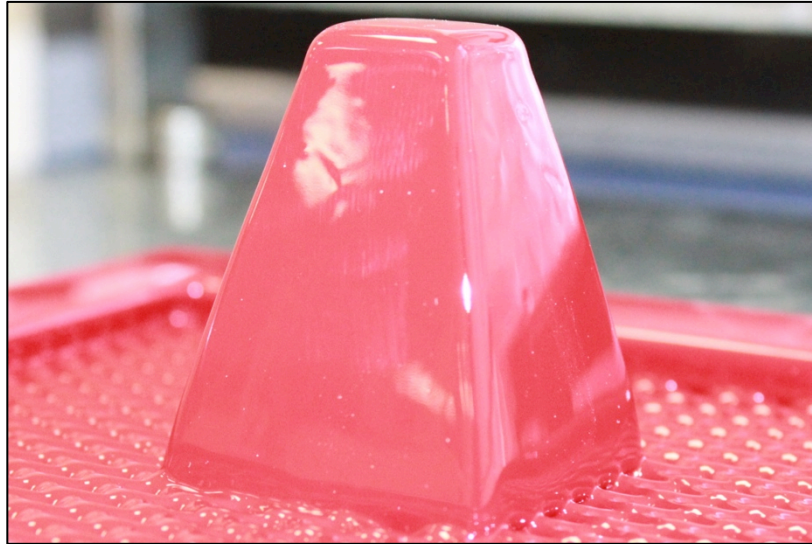
1. $\beta=15^\circ/h=45\text{mm}$
2. 38s
3. HIPS 1.5mm
4. Chafan $45^\circ \times 0.5\text{mm}$
5. No inmediata/con rotura
6. -0.8bar
7. 30s

Resultados cualitativos

Teniendo en cuenta los anteriores ensayos, se formula la hipótesis de que se forma una disminución de grosor en el material que depende de la distancia a la que se coloca el molde del borde de la ventana reductora.

En este ensayo, el molde se coloca muy céntrico para intentar evitar la tendencia de que se produzca cualquier deformación por la proximidad del mismo a los bordes de la ventana reductora.

En efecto, se consiguen resultados muy favorables, pero hay un pequeño cúmulo de material en el vértice superior de la cara 3 observable en la imagen a continuación.



Se producen deformaciones en la base que se deben a la alta presión de vaciado. Esto se observa en la imagen a continuación.



Este hecho determina que la presión de vaciado utilizada es demasiado alta y hace falta reducirla aún más.

Resultados cuantitativos

		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
11	5 mm	0.85	0.9	0.9	0.85
	10 mm	0.85	0.8	0.8	0.8
	15 mm	0.85	0.8	0.85	0.8
	20 mm	0.85	0.8	0.9	0.8
	25 mm	0.85	0.8	0.95	0.8
	30 mm	0.85	0.8	1	0.8
	35 mm	0.85	0.8	1	0.8
	40 mm	0.85	0.8	0.9	0.8
	45 mm	0.7	0.75	0.85	0.8

Se observa un buen acabado y bastante uniformidad en el grosor de las paredes del ensayo.

4.3.2 Ensayos con dos moldes simultáneos

4.3.2.1 Ensayo 1

1. $\beta=5^\circ/h=40\text{mm}$ | $\beta=10^\circ/h=45\text{mm}$
2. 40s
3. HIPS 1.5mm
4. Afiladas
5. No inmediata/con rotura
6. -0.8bar
7. 40s

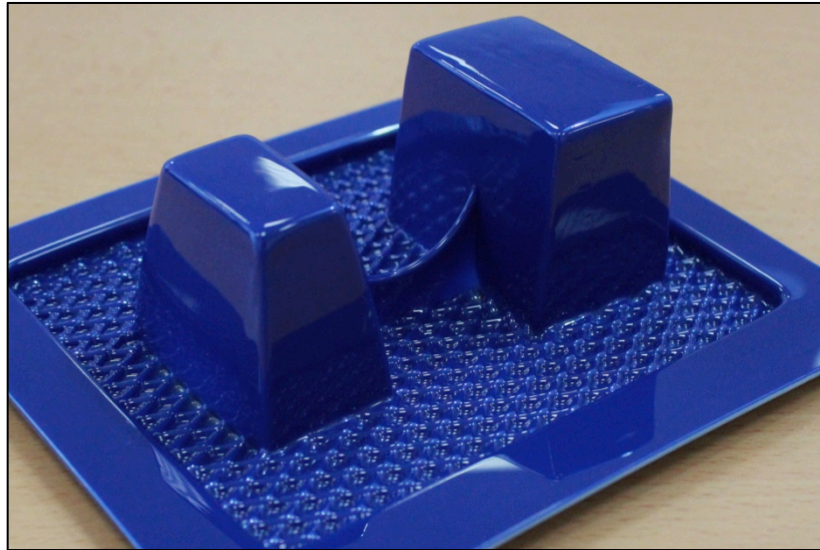
Resultados cualitativos.

Al ser el primer ensayo que se realiza con dos moldes simultáneos se tiene poca experiencia en cuanto a conocimientos de colocación. Se produce una arruga grande debida a la poca distancia que hay entre los moldes.

La aparición de la arruga es un claro indicador de la falta que hace falta un sistema de atrapa-arrugas.

Se puede determinar que los primeros 5 mm de material en cada caso son prácticamente desechables debido a que se produce una extrema delgadez de material y no presenta las mismas características de rigidez que el resto de la geometría.

En ambos moldes, se observan zonas en las que el grosor de las paredes se reduce de manera repentina. Estas zonas son las correspondientes a las caras que están expuestas hacia fuera y correspondientes con el borde 2 y 4 de la ventana reductora.



Resultados cuantitativos

		Molde de 5°			
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
1	5 mm	1.05	1	1	1
	10 mm	0.85	0.85	0.8	0.9
	15 mm	0.75	0.85	0.7	0.85
	20 mm	0.6	0.75	0.6	0.8
	25 mm	0.5	0.7	0.55	0.7
	30 mm	0.4	0.65	0.5	0.65
	35 mm	0.3	0.6	0.45	0.6
	40 mm	0.2	0.55	0.4	0.5

		Molde de 15°			
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
1.1	5 mm	1.05	1.1	1.05	1
	10 mm	0.9	1	0.9	0.9
	15 mm	0.75	0.95	0.85	0.9
	20 mm	0.65	0.95	0.75	0.85
	25 mm	0.55	0.9	0.65	0.85
	30 mm	0.5	0.85	0.6	0.75
	35 mm	0.4	0.8	0.5	0.65
	40 mm	0.35	0.75	0.35	0.65
	45 mm	0.25	0.65	0.25	0.55

4.3.2.2 Ensayo 2

1. $\beta=5^\circ/h=40\text{mm}$ | $\beta=10^\circ/h=45\text{mm}$
2. 40s
3. HIPS 1.5mm
4. Afiladas
5. No procede
6. No procede
7. No procede

Resultados cualitativos

No se pudo completar al 100% el ensayo. Fue desastroso por el sobredimensionamiento de los pequeños bloques de madera. Estos tenían la función de *atrapar* el material sobrante entre ambos moldes. Sin embargo, por estar tan sobredimensionados resultaron tener el efecto contrario y producir arrugas más grandes entre ellos mismos y los moldes de ensayo.

Aparece una rotura en el material que se produce por debajo de una de las arrugas formadas entre la madera y el molde. Se debe a un sobreestiramiento del material termoplástico.



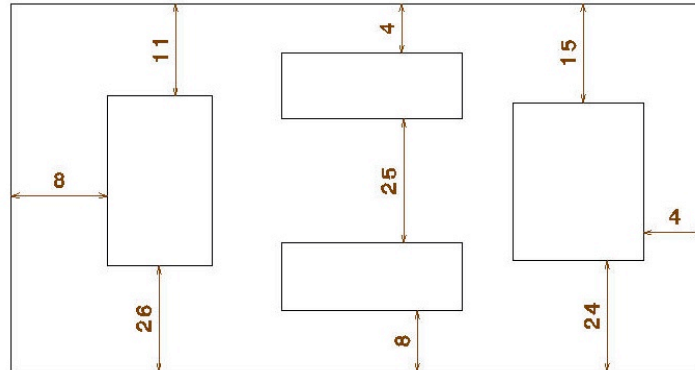
Los resultados son desastrosos y las piezas fabricadas son para desecho. No se pudo terminar el ensayo en su totalidad debido a una rotura en la parte inferior de una de las esquinas entre el molde de 5° y uno de los pequeños bloques de madera. Se ocasiona por un sobreestiramiento del material termoplástico, existe un acúmulo excesivo donde se forma la arruga hasta que vence el material a escasos milímetros más abajo.

No se tuvo en cuenta la distancia entre el marco de la ventana reductora y ambos moldes, en consecuencia se puede observar una diferencia en la reproducción final.

En el caso del molde de 5°, la cara considerada exterior está situada a 8 mm del borde y se produce una delgadez excesivamente apreciable a simple vista.

En cambio, tomando como referencia el molde de 10°, la cara exterior se sitúa a tan solo 4 mm del borde. Visualmente, los resultados son bastante mejores; sin embargo, no hay una reproducción completa de la pieza (aunque esto se debe estrictamente a que se produjo una rotura en el material).

El enfriamiento inicial es bastante fuerte y puede observarse a contraluz la disminución del grosor de las paredes laterales.



No se pudo realizar un estudio cuantitativo de las piezas debido a la rotura del ensayo.

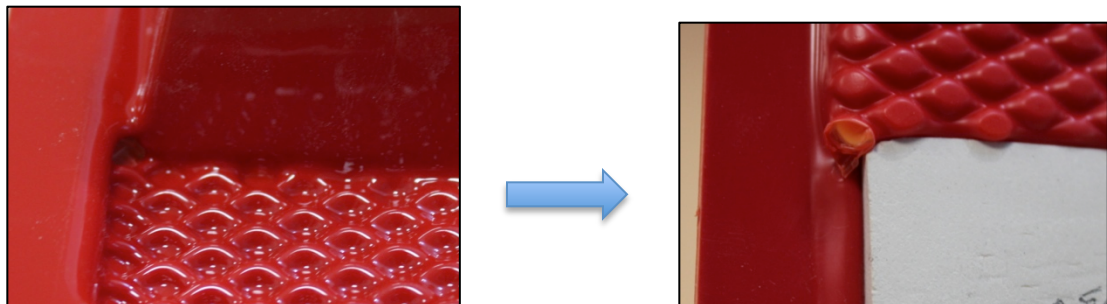
4.3.2.3 Ensayo 4

Se tiene en cuenta la destrucción del ensayo 2 para reducir el tamaño de los atrapa-arrugas.

1. $\beta=10^\circ/h=40\text{mm}$ | $\beta=15^\circ/h=45\text{mm}$
2. 40s
3. HIPS 1.5mm
4. Afiladas
5. Liberación inmediata
6. -0.9 bar
7. 35s

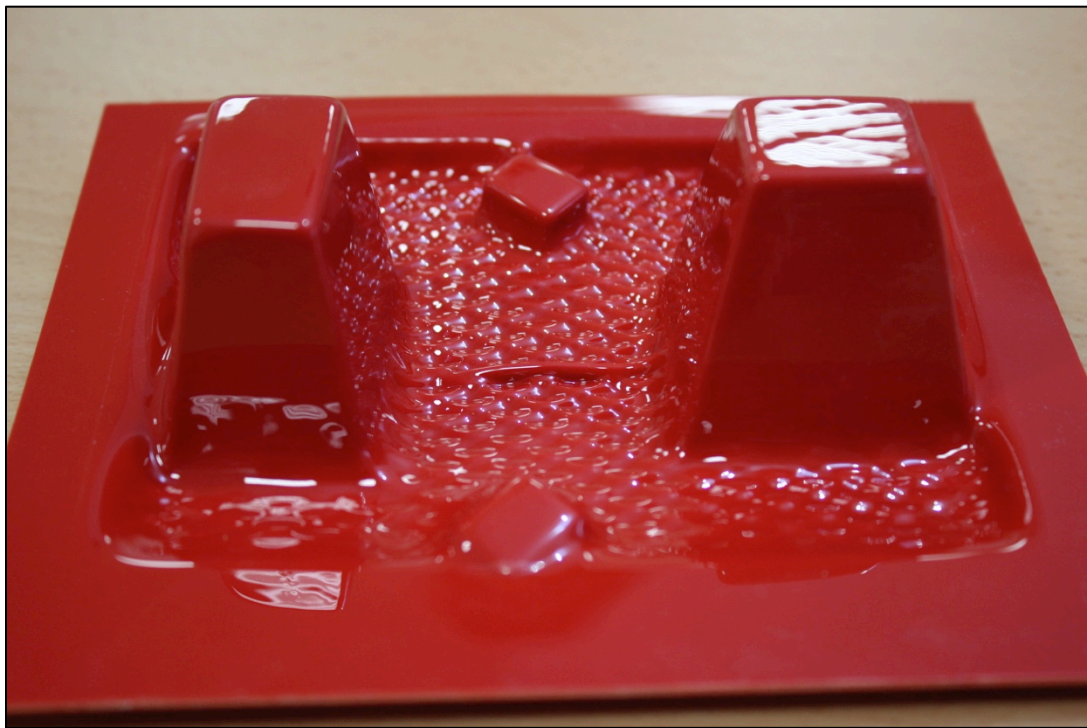
Resultados cualitativos.

Los resultados son positivos, se consigue la primera liberación de molde y pieza sin rotura; sin embargo, uno de los pequeños bloques de madera estaba demasiado cerca del borde del marco sellador. Esto produjo una pequeña abertura que hacía que el hueco no estuviera completamente estanco.



Debido a la proximidad entre el molde de 15° y el marco sellador, se produjo una pequeña rotura del material termoplástico por la elevada presión que causó que a aproximadamente el 95% de progreso del proceso hubiera una entrada de aire no deseada.

La reproducción de los moldes es casi excelente a simple vista en el molde de 15° sin embargo, en el molde de 10° se pueden observar por dos caras, la exterior más cercana al marco fijador y la contigua, que a causa del defecto tan grande en la primera continua hacia la otra, una disminución *drástica* en la uniformidad del grosor de lámina.



Resultados cuantitativos

		Molde de 10°			
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
4	5 mm	0.95	0.95	0.95	0.9
	10 mm	0.6	0.9	0.95	0.7
	15 mm	0.45	0.85	0.9	0.7
	20 mm	0.4	0.85	0.9	0.7
	25 mm	0.4	0.75	0.85	0.7

	30 mm	0.4	0.75	0.8	0.7
	35 mm	0.35	0.75	0.75	0.7
	40 mm	0.3	0.7	0.7	0.7

		Molde de 15°			
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
4.1	5 mm	1	1.2	0.95	0.9
	10 mm	0.9	0.85	0.85	0.6
	15 mm	0.85	0.6	0.85	0.45
	20 mm	0.75	0.6	0.85	0.45
	25 mm	0.7	0.6	0.8	0.45
	30 mm	0.7	0.6	0.75	0.4
	35 mm	0.6	0.6	0.75	0.4
	40 mm	0.55	0.7	0.7	0.5
	45 mm	0.55	0.85	0.4	

Las caras expuestas directamente a los bordes de la ventana reductora son las que presentan las mayores disminuciones de grosor.

4.3.2.4 Ensayo 5

Se vuelve a repetir una prueba sin atrapa-arrugas, con la diferencia de que los moldes cuentan con un acabado distinto en los vértices de la cara superior.

1. $\beta=10^\circ/h=40\text{mm}$ | $\beta=5^\circ/h=40\text{mm}$
2. 40s
3. HIPS 1.5mm
4. Chaflanes 0.5mm x 45°
5. No/con roturas
6. -0.9 bar
7. 35s

Resultados cualitativos.

Uno de los primeros errores que se produce al hacer el ensayo es que se descuida el factor de la presión y se realiza un vaciado hasta el máximo permitido por la máquina.



En la esquina superior derecha de la imagen se observa un hueco que indica que la presión de vaciado es demasiado alta para la prueba.

Se puede observar una pequeña deformación en forma de arruga en la separación de ambos moldes. También es posible ver que hay una tendencia a que ocurran repentinas disminuciones en el grosor de las paredes exteriores -las que están más próximas los bordes de la ventana reductora.

En ambas piezas resultantes se consiguen resultados más estables en general. En las partes externas hay una disminución más progresiva en el grosor de las paredes.

Resultados cuantitativos

		Molde de 10°			
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
5	5 mm	1.1	0.85	1	0.95
	10 mm	0.75	0.7	0.7	0.75
	15 mm	0.7	0.7	0.6	0.65
	20 mm	0.7	0.7	0.6	0.6
	25 mm	0.7	0.7	0.45	0.6

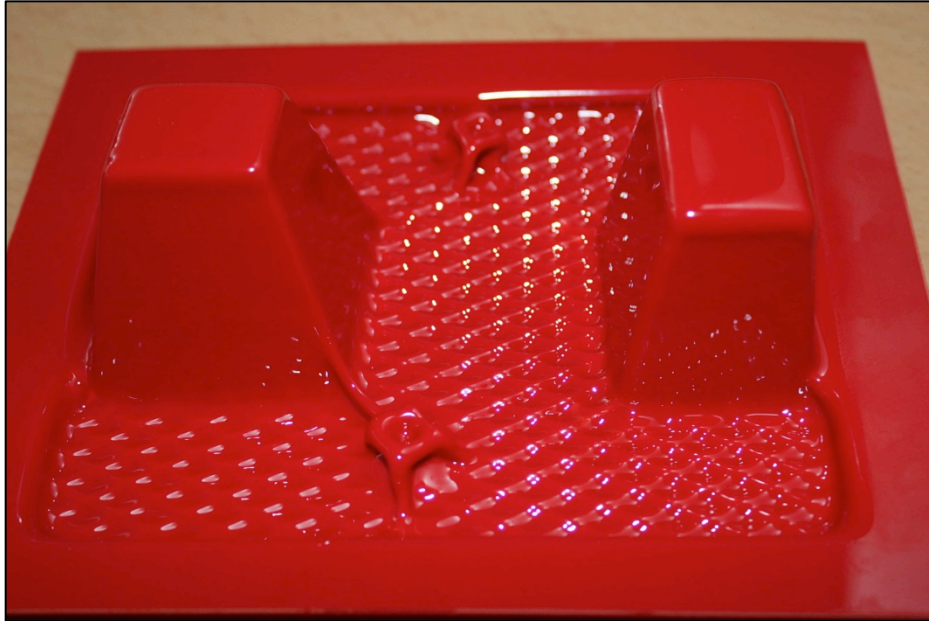
	30 mm	0.7	0.65	0.3	0.6
	35 mm	0.7	0.6	0.25	0.6
	40 mm	0.6	0.5	0.15	0.6

		Molde de 5°			
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
5.1	5 mm	1.1	1.1	0.9	1
	10 mm	0.7	0.8	0.75	0.75
	15 mm	0.5	0.8	0.7	0.75
	20 mm	0.5	0.75	0.7	0.75
	25 mm	0.5	0.7	0.75	0.7
	30 mm	0.35	0.7	0.75	0.75
	35 mm	0.3	0.7	0.7	0.75
	40 mm	0.25	0.55	0.65	0.7

4.3.2.5 Ensayo 7

1. $\beta=10^\circ/h=40\text{mm}$ | $\beta=15^\circ/h=40\text{mm}$
2. 34s
3. HIPS 1.5mm
4. Afiladas/Chaflanes 0.75mm x 45°
5. Sí
6. -0.7 bar
7. 30

Se realiza un ensayo de verificación de funcionalidad de los atrapa-arrugas y no se realiza un estudio cuantitativo, con la diferencia siendo que se utiliza material foam al estilo del molde perdido.



Estudio cualitativo.

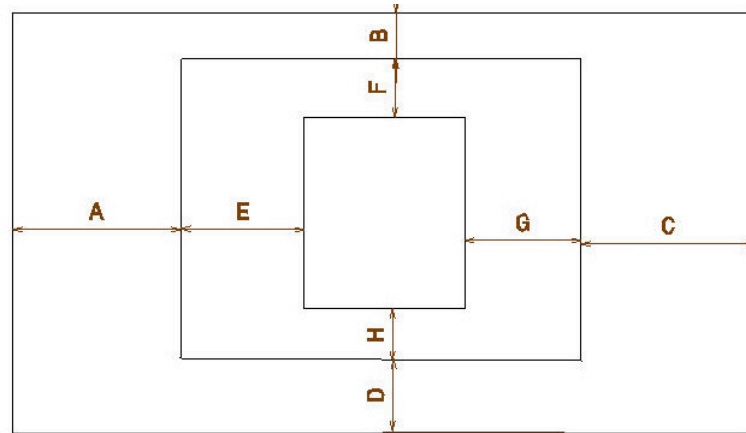
Se verifica que los atrapa-arrugas cumplen con su función cuando son de pequeñas dimensiones, aproximadamente 7x7x7mm.

Sin embargo en la prueba sí se producen porque durante el ensayo, al bajar la bandeja de los moldes se movieron debido a su bajo peso. La mala colocación causó que uno de las pequeñas piezas se acercara demasiado a un molde y resultó en la aparición de arrugas.

Como añadido, la proximidad de los moldes a los bordes de la ventana reductora producen el defecto de disminución de grosor cerca de la base superior del mismo.

4.3.3 Ensayos de moldes con plataformas

En aquellos ensayos que se tiene la información de situación en la bandeja de trabajo se incluirá de la siguiente forma.



A	B	C	D	E	F	G	H
---	---	---	---	---	---	---	---

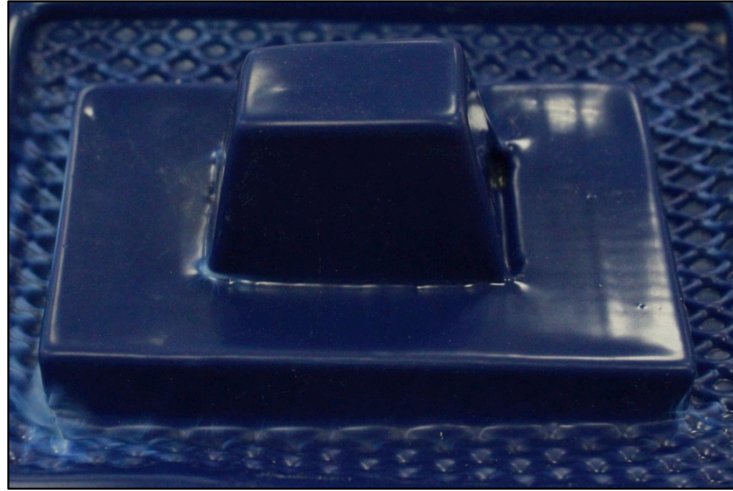
4.3.3.1 Ensayo 1

1. $\beta=10^\circ/h=40\text{mm}$
2. 34s
3. HIPS 1.5mm
4. Afiladas
5. Sí
6. -0.7 bar
7. 30

Resultados cualitativos

El molde se colocó dentro de un pequeño marco de madera con el fin de que se produjera una liberación más fácil.

Dicho marco tenía dimensiones: 57 x 88 x 10 [mm]. No tenía una calidad geométrica exacta y produjo algunos defectos.



Como no tenía una definición geométrica exacta, había un hueco pequeño entre el molde y el marco. Esto llevó a que el proceso de vaciado produjera una rotur. Sin embargo, como la rotura se produjo casi al final del proceso de vaciado, se pudo realizar el proceso de termoconformado en la parte expuesta del molde correctamente. Este método que utiliza una base de madera beneficia en creces los resultados en comparación con los otros ensayos. La reproducción del molde presenta visualmente grosores más uniformes que en otros casos.

Además de todo esto expuesto, cuando se terminó el ensayo hubo una liberación del material casi inmediata.

Resultados cuantitativos

		10° con plataforma			
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
1	5 mm	1.2	1	1.05	1.05
	10 mm	1.1	0.95	0.95	0.95
	15 mm	1	0.95	0.95	0.95
	20 mm	0.95	0.95	0.95	0.95
	25 mm	0.95	0.9	0.9	0.95
	30 mm	0.9	0.8	0.85	0.9

4.3.3.2 Ensayo 2

1. $\beta=15^\circ/h=30\text{mm}$
2. 34s
3. HIPS 1.5mm
4. Afiladas/Chaflanes 0.5mm x 45°
5. Sí
6. -0.7 bar
7. 30S

A	B	C	D	E	F	G	H
27mm	22mm	27mm	22mm	18mm	12mm	17mm	12mm

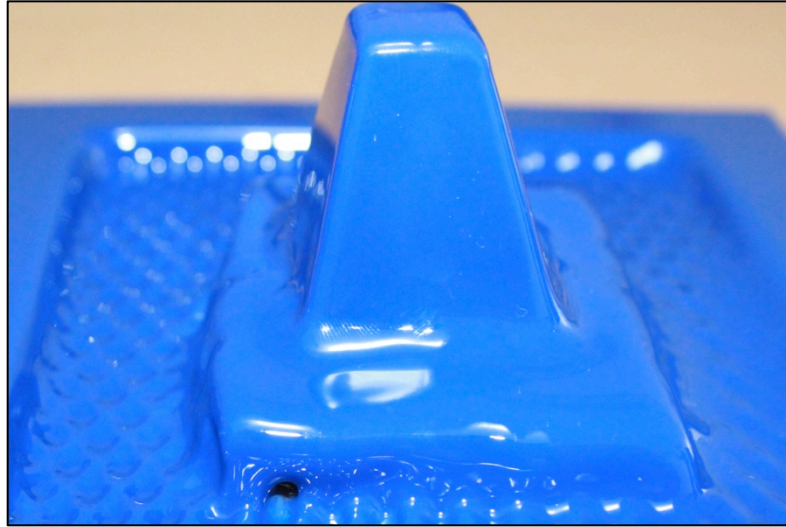
Teniendo en cuenta los buenos resultados de cuando se utilizó la plataforma de madera, se repitió el estilo del ensayo pero utilizando de material *Foam* que sería más fácil cortarlo con las medidas deseadas para que se adaptara al molde mejor.

Resultados cualitativos

El material foam no resiste temperaturas tan altas como aquellas a las que se someten los termoplásticos para llevar a cabo el proceso de termoconformado. Es por esto que interesa sobredimensionar un poco la plataforma porque se deformará un poco. Es inevitable una vez se ha realizado el ensayo, que se deseché el material foam para poder conseguir una liberación fácil de plástico y molde.

La desventaja que supone esto es que se trabaja con un molde de dimensiones considerablemente más pequeñas. Esto se traduce en que la pieza resultante será muy pequeña.

Durante el proceso de vaciado en el ensayo se produce una rotura, la cual se debe a la poca exactitud de la base de la plataforma. Se originan puntos en los que se concentra mucha tensión debido a la depresión que crea la máquina.



Una vez se procedió a eliminar parte del material foam, se pudo realizar una liberación inmediata del molde. Los resultados fueron muy positivos y casi perfectos en comparación con los ensayos anteriores.

Utilizando este método, es importante que los moldes estén incluso más sobredimensionados por la base ya que, esta parte será desperdiciada.

Resultados cuantitativos

		10°			
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
13	5 mm	1	1	0.95	0.95
	10 mm	0.95	0.95	0.9	0.9
	15 mm	1	1	1	0.95
	20 mm	1.05	1.05	1	1.05
	25 mm	1.05	1.05	1.05	1.05
	30 mm	1	1	1.1	1.05

Se puede observar en la tabla que los valores son muy constantes, resultado que indica que es un ensayo bastante óptimo.

4.3.3.3 Ensayo 4

1. $\beta=5^\circ/h=35\text{mm}$
2. 34s
3. HIPS 1.5mm
4. Afiladas
5. Sí
6. -0.7 bar
7. 30s

A	B	C	D	E	F	G	H
21mm	22mm	24mm	22mm	12mm	8mm	10mm	10mm

Resultados Cualitativos.

Se utiliza una plataforma de foam que se deforma de nuevo por la depresión causada. El molde utilizado es el de 5° . Debido al uso de la plataforma, la altura útil que queda del molde es equivalente a tan solo 35mm.

Los resultados son favorables en cuanto a propagación y estiramiento de material durante el proceso.

En las caras 1 y 3 hay un pequeño cúmulo de material en los vértices que se debe, posiblemente, a que están acabados de manera *puntiaguda*.

Se consigue una liberación inmediata tras retirar el foam.



Resultados cuantitativos.

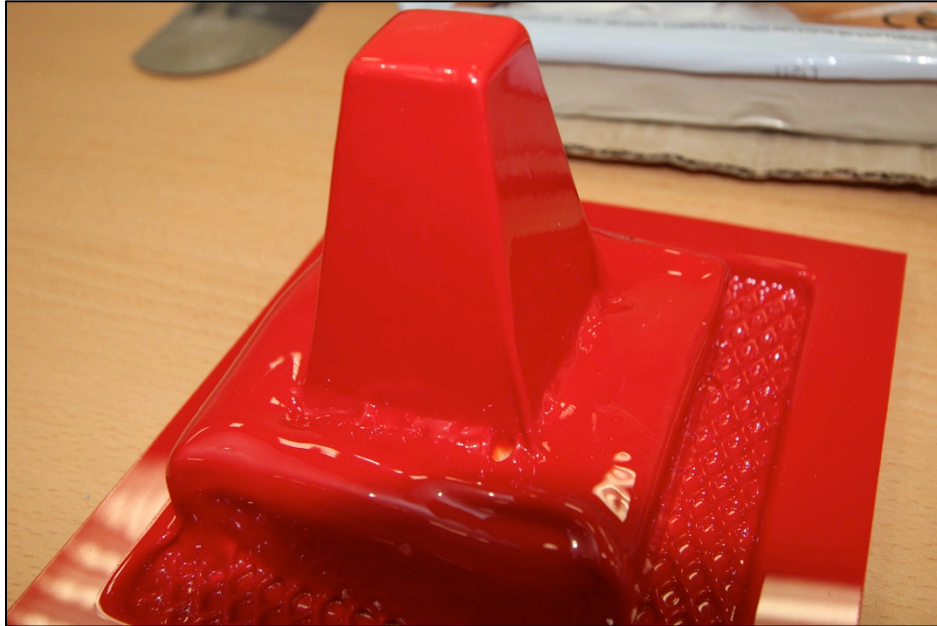
		5°			
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
4	5 mm	1.1	1	1	1
	10 mm	0.95	0.85	0.85	0.85
	15 mm	0.9	0.8	0.85	0.85
	20 mm	0.85	0.8	0.8	0.85
	25 mm	0.85	0.8	0.8	0.8
	30 mm	0.75	0.75	0.75	0.8
	35 mm	0.6	0.65		

Se considera un ensayo destacable por la uniformidad que presenta el material en su espesor a lo largo de sus paredes laterales. Aparte de esto, resulta ser el primer ensayo que consigue una liberación con un ángulo de inclinación en las paredes tan pequeño.

4.3.3.4 Ensayo 9

1. $\beta=10^\circ/h=60\text{mm}$
2. 34s
3. HIPS 1.5mm
4. Afiladas
5. Sí
6. -0.7 bar
7. 30s

A	B	C	D	E	F	G	H
15mm	0mm	15mm	15mm	17mm	17mm	17mm	17mm



Resultados cualitativos

La plataforma tiene una altura de 25mm. Del uso, el molde tiene algunas imperfecciones que se aprecian en la pieza final. Hay formación de arrugas debido a que la plataforma confeccionada sobresale demasiado por los laterales de la pieza. Se evitaría esto si fuera más pequeño. Resultaría en que la lámina calentada no tocaría primero con la base de la pieza y se evitaría la formación de la arruga.

Hay disminución de grosor en la parte superior de la cara 3 que cumple la tendencia que hay en la gran mayoría de los ensayos.

Resultados cuantitativos

		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
9	5 mm	0.85	1	1	0.8
	10 mm	0.65	0.7	0.45	0.6
	15 mm	0.65	0.55	0.45	0.6
	20 mm	0.65	0.55	0.4	0.65
	25 mm	0.7	0.55	0.35	0.7
	30 mm	0.7	0.55	0.5	0.75
	35 mm	0.7	0.6	0.55	0.8
	40 mm	0.7	0.65	0.6	0.8
	45 mm	0.7	0.75	0.65	0.8
	50 mm	0.7	0.7	0.65	0.8
	55 mm	0.7	0.65	0.55	0.75
	60 mm	0.5	0.55	0.55	0.75

Tras el análisis de los resultados cualitativos de este ensayo se puede determinar en parte, con certeza que la hipótesis, que establece que la disminución de espesor repentina en la cara 3 del material es dependiente de la distancia al borde de la ventana reductora, es errónea. Pues en esta prueba, al sumar las distancias D+H se obtiene una distancia de la cara lateral 3 al borde de 32mm; medida de casi el doble que la distancia de B+F.

4.4 Resultados de los ensayos con moldes de Ureol

4.4.1 Resultados de ensayos con moldes lubricados

En este apartado se describen los resultados cualitativos y cuantitativos de las pruebas que se realizan en HIPS de 1.5mm con los moldes lubricados.

Se representarán las pruebas más significativas de la serie, la cual se encuentra entera desglosada en ANEXOS. Con ella se podrá posteriormente determinar cuáles son los ensayos óptimos en relación a:

- Mínimas deformaciones
- Liberación inmediata
- Reproducción de los moldes

Sabiendo que los parámetros de tiempo de exposición, presión de vaciado y tiempo de enfriamiento no variarán y se establecen respectivamente sus valores a 34s, -0.7 bar y entre 25 y 30 segundos.

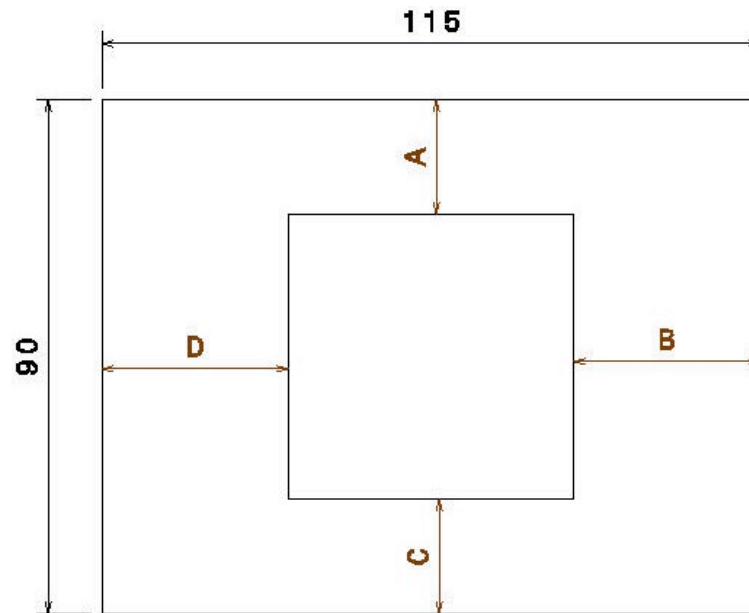
Al ser constante esos parámetros ya no se mencionarán en los apartados de cada ensayo descrito.

El resto de información se recopila de la siguiente manera:

1. Tipo de molde, β y h.
2. Acabado de vértices
3. Liberación

La colocación de los moldes en la bandeja viene descrita de acorde con la siguiente figura y sondatos que se recogerán en una pequeña tabla con el siguiente formato:

A [mm]	B[mm]	C[mm]	D[mm]
--------	-------	-------	-------

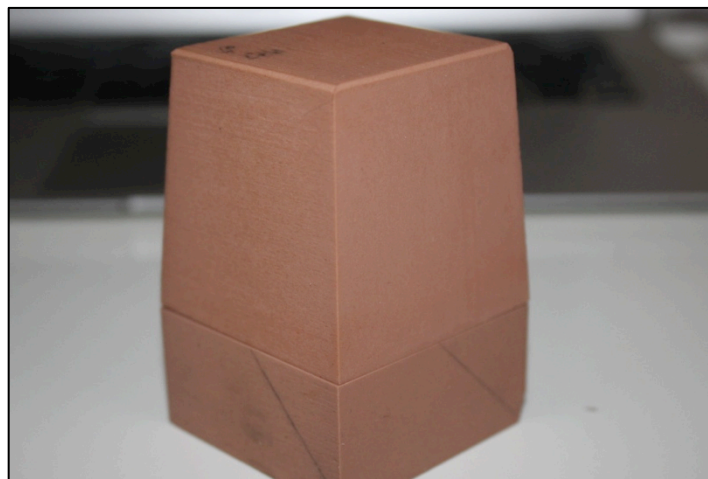


4.4.1.1 Ensayo 1

1. $\beta=4^\circ$ $h=75\text{mm}$
2. 4° Vértices acabados en chaflán $45^\circ \times 0.75[\text{mm}]$
3. Liberación con roturas

Resultados cuantitativos.

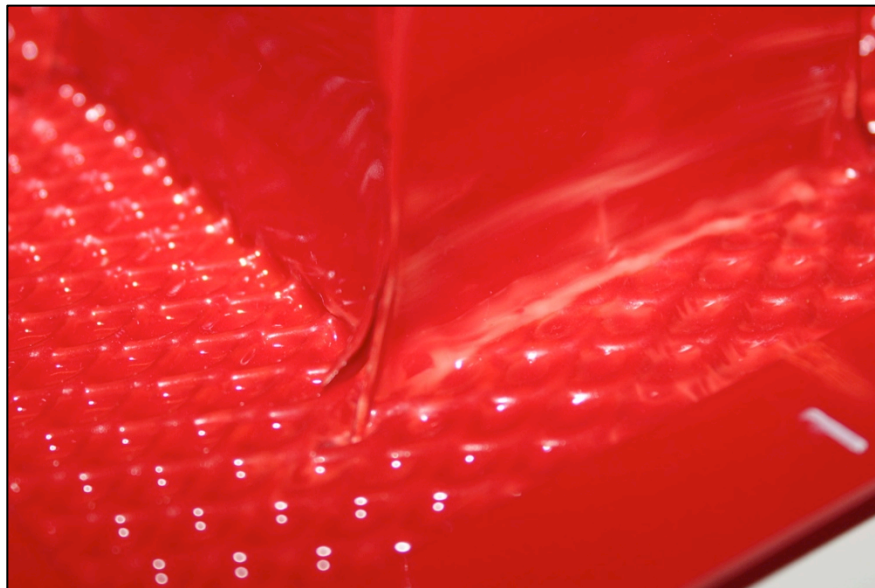
En un principio, los moldes iniciales, al salir de la máquina CNC, contaban con un área de 25 mm de altura en su base que tenía paredes laterales que formaban 90° con el plano horizontal. Este área inicial es el principal causante de la imposibilidad de separar el molde del material termoplástico.



A simple vista se aprecia bastante variación en el grosor del termoplástico en los puntos más elevados respecto a la base.



En la base de los vértices laterales hay formación de arrugas de un tamaño bastante destacable.



Resultados cuantitativos.

A [mm]	B[mm]	C[mm]	D[mm]
20.3	32.5	25	36

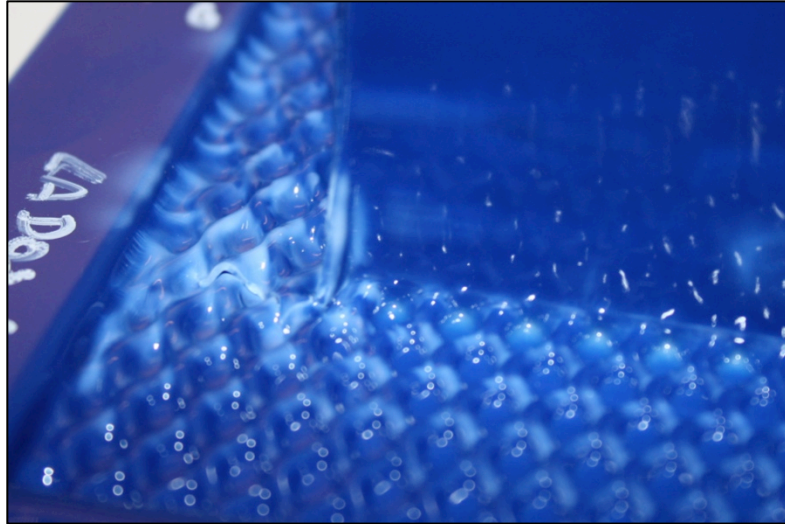
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
1	5 mm	0.95	0.95	0.85	0.95
	10 mm	0.48	0.72	0.48	0.68
	15 mm	0.33	0.62	0.43	0.6
	20 mm	0.33	0.54	0.4	0.58
	25 mm	0.33	0.53	0.42	0.56
	30 mm	0.35	0.52	0.48	0.56
	35 mm	0.43	0.51	0.48	0.53
	40 mm	0.43	0.51	0.51	0.53
	45 mm	0.56	0.49	0.53	0.49
	50 mm	0.52	0.48	0.53	0.48
	55 mm	0.47	0.45	0.53	0.48
	60 mm	0.46	0.34	0.5	0.42
	65 mm	0.43	0.35	0.47	0.4
	70 mm	0.39	0.33	0.43	0.37
	75 mm	0.34	0.25	0.39	0.34

4.4.1.2 Ensayo 4

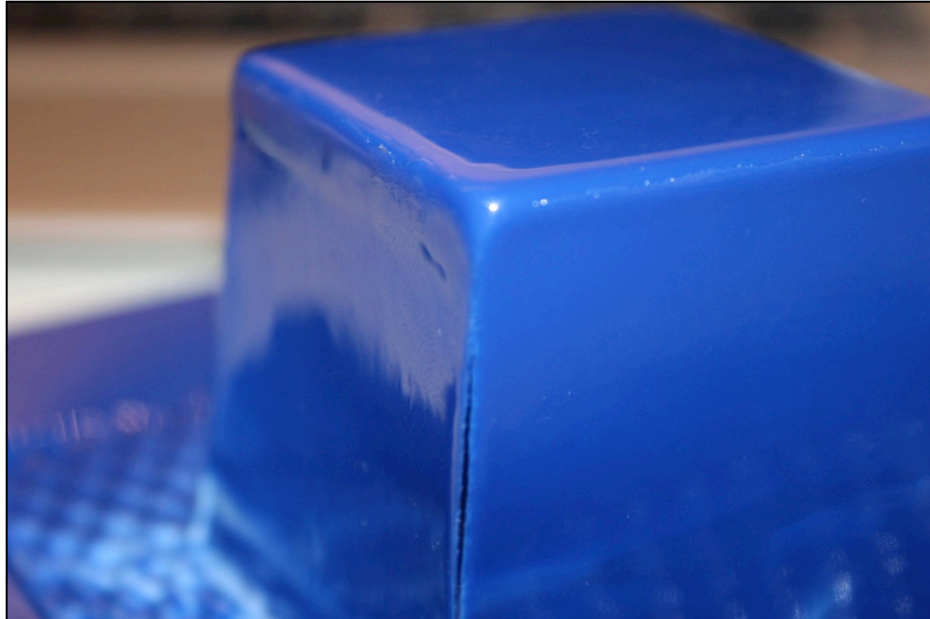
1. $\beta=2^\circ$ h=50mm
2. Vértices acabado afilado
3. Liberación con roturas

Resultados cuantitativos.

Aparece una tendencia de crearse arrugas en las piezas que se acercan mucho a 90° respecto al plano horizontal.



Esta pieza no se liberó y se tuvo que romper para conseguir la separación deseada. De nuevo hay uno de los laterales que se encuentran situados bastante cerca de uno de los bordes de la ventana reductora y es la cara lateral que sufre más deformación en cuanto al grosor, cara 3. Se producen roturas por tener vértices demasiado afilados.



Estudio cuantitativo.

A [mm]	B[mm]	C[mm]	D[mm]
28.5	32.5	18	33

		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
4	5 mm	1.02	0.94	0.99	0.99
	10 mm	0.78	0.76	0.56	0.75
	15 mm	0.78	0.72	0.49	0.71
	20 mm	0.78	0.7	0.46	0.65
	25 mm	0.78	0.7	0.48	0.62
	30 mm	0.76	0.68	0.5	0.62
	35 mm	0.72	0.67	0.5	0.6
	40 mm	0.68	0.66	0.5	0.58
	45 mm	0.61	0.58	0.4	0.51
	50 mm		0.49	0.36	0.42

4.4.1.3 Ensayo 8

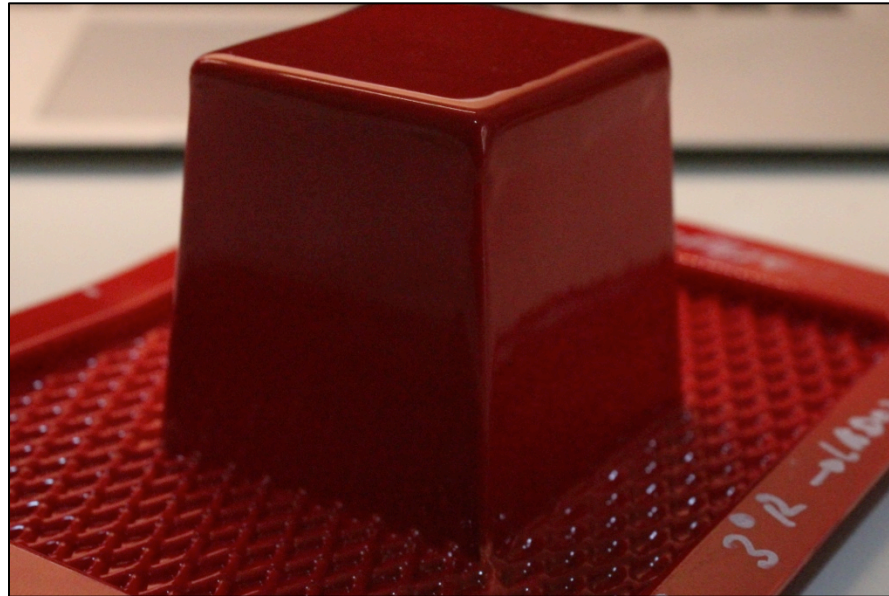
1. $\beta=3^\circ$ h=55mm
2. Vértices Vivos y Redondeados
3. Liberación inmediata

Resultados cualitativos.

Los vértices vivos que causaban roturas en la pieza final son ligeramente lijadas, 2 pasadas con una lija de gránulo fino P 120.

La pieza es lubricada con aproximadamente la misma cantidad que el resto de las pruebas y se consigue la primera liberación inmediata con un ángulo de inclinación tan pequeño. Cerca de la base, hasta una altura de aproximadamente 2mm hay indicios de formación de una pequeña arruga por exceso de material.

El grosor de las paredes laterales es bastante uniforme al tacto, exceptuando la cara 3 que presenta aproximadamente 6mm de material más grueso y una disminución repentina.



Resultados cuantitativos.

A [mm]	B[mm]	C[mm]	D[mm]
27	35.5	21	34

		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
8	5 mm	0.9	0.98	0.93	0.97
	10 mm	0.7	0.72	0.82	0.74
	15 mm	0.7	0.7	0.55	0.69
	20 mm	0.7	0.7	0.55	0.64
	25 mm	0.69	0.68	0.57	0.68
	30 mm	0.69	0.67	0.57	0.69
	35 mm	0.68	0.66	0.6	0.65
	40 mm	0.67	0.66	0.6	0.6
	45 mm	0.64	0.59	0.57	0.63
	50 mm	0.62	0.58	0.54	0.57
	55 mm			0.53	0.57

4.4.1.4 Ensayo 9

1. $\beta=4^\circ$ h=50mm
2. Vértices ligeramente desbastados
3. Liberación inmediata

A partir de este ángulo de inclinación es indiferente que los vértices laterales estén acabados en filis, la reproducción será buena y la liberación inmediata.

Resultados cualitativos.

Molde con paredes laterales con 4° de inclinación respecto a la vertical. Los vértices superiores fueron desbastados ligeramente y los laterales se dejaron en filo.



El exceso de lubricación produjo unos pequeños bultos visibles en la superficie que sólo afectaron la calidad visual de la pieza final. Hubo una liberación inmediata del molde respecto a la pieza final.

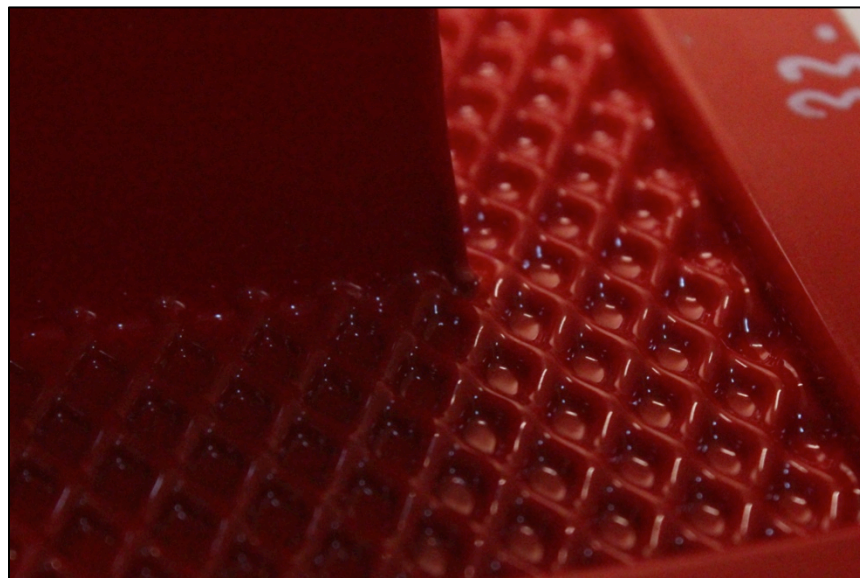
El hecho de que los vértices laterales no se hayan lijado ni desbastado para nada desde su mecanizado con la máquina CNC no impide ni afecta de ninguna manera la liberación de la pieza.

De nuevo la pieza a moldear fue colocada un poco más cerca del borde de la ventana reductora correspondiente con la Cara 3 y se volvió a producir una

reducción repentina en el grosor del material a partir de aproximadamente 6mm.



En la base de la pieza final, hay indicios de formación de arrugas por exceso de material concentrado. Existe una relación con la formación de arrugas entre la inclinación que tienen las paredes del molde y la altura total del mismo.



Resultados cuantitativos.

A [mm]	B[mm]	C[mm]	D[mm]
28	36.5	19.5	33.5

		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
9	5 mm	0.99	0.95	0.95	1.05
	10 mm	0.73	0.77	0.95	0.75
	15 mm	0.72	0.75	0.48	0.75
	20 mm	0.72	0.72	0.49	0.78
	25 mm	0.72	0.72	0.53	0.73
	30 mm	0.72	0.71	0.56	0.7
	35 mm	0.72	0.66	0.57	0.7
	40 mm	0.66	0.65	0.58	0.63
	45 mm	0.66	0.59	0.54	0.59
	50 mm	0.64	0.58	0.49	0.56
	55 mm	0.51	0.49	0.48	0.46

4.4.1.5 Ensayo 11

Esta prueba determina el cambio de la no aparición de arrugas en la base por acercarse la inclinación de las paredes a 90°

1. $\beta=8^\circ$ h=55mm
2. Vértices 1 y 3 acabados en chaflán 45°x0.75[mm]. Vértices 2 y 4 acabados en R=0.75[mm]
3. Liberación inmediata

Resultados cualitativos.

Los resultados son favorables, se obtiene una liberación inmediata y desaparece la formación de pequeñas de arrugas en la base, pasada la inclinación de 5° se supera el valor de la relación entre altura e inclinación, responsable de que se formasen las arrugas.

En la cara 3 se disminuye la acumulación de material termoplástico cerca de la base superior en comparación con las anteriores pruebas.



Resultados cuantitativos.

A [mm]	B[mm]	C[mm]	D[mm]
24.5	35.5	22.5	33

		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
11	5 mm	1.05	0.97	1.1	1.05
	10 mm	0.78	0.85	0.75	0.85
	15 mm	0.76	0.8	0.65	0.8
	20 mm	0.75	0.8	0.65	0.8
	25 mm	0.75	0.8	0.65	0.75
	30 mm	0.75	0.79	0.68	0.75
	35 mm	0.73	0.78	0.7	0.75
	40 mm	0.71	0.73	0.68	0.72
	45 mm	0.71	0.73	0.63	0.71
	50 mm	0.68	0.69	0.63	0.63
	55 mm	0.66	0.6		

4.4.2 Resultados de ensayos con moldes no lubricados

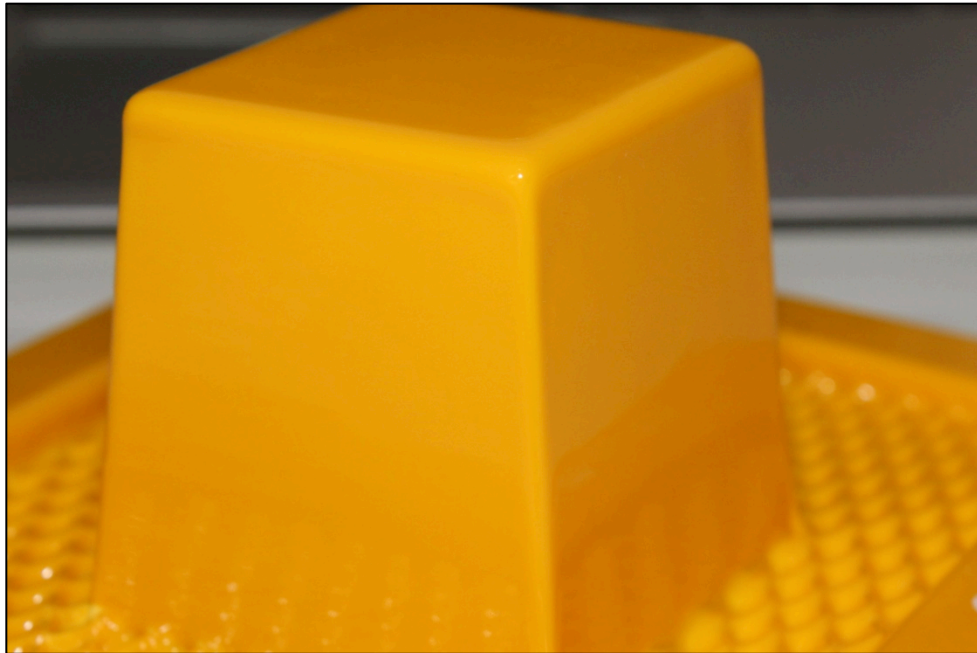
4.4.2.1 Ensayo 1

Esta prueba resulta ser el ensayo que consigue una liberación inmediata con sin lubricación con el ángulo de inclinación de las paredes más pequeños.

1. $\beta=3^\circ$ $h=50\text{mm}$
2. Vértices acabados en $R=0.75[\text{mm}]$
3. Liberación inmediata

Resultados cualitativos.

El molde se sitúa más céntrico pero igualmente más cerca del borde número 3. Se produce menor cúmulo de material termoplástico cerca del vértice 3. Hay pequeñas arrugas en las bases de los vértices laterales debido a la relación entre altura e inclinación.



Resultados cuantitativos.

A [mm]	B[mm]	C[mm]	D[mm]
26.5	39	18.5	31.5

		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
1	5 mm	0.98	1.01	0.99	1.05
	10 mm	0.87	0.81	0.61	0.81
	15 mm	0.84	0.76	0.61	0.79
	20 mm	0.81	0.75	0.61	0.76
	25 mm	0.77	0.73	0.61	0.73
	30 mm	0.75	0.73	0.6	0.68
	35 mm	0.7	0.7	0.57	0.64
	40 mm	0.65	0.67	0.55	0.63
	45 mm	0.65	0.62	0.48	0.52
	50 mm	0.56	0.53	0.42	0.4

4.4.2.2 Ensayo 5

Los resultados favorables indican que es un ensayo óptimo.

1. $\beta=8^\circ$ h=50mm
2. Vértices 1 y 3 ligeramente desbastados. Vértices 2 y 4 R=0.75[mm]
3. Liberación inmediata

Resultados cualitativos.

El molde se coloca bastante céntrico en el espacio indicado. Los resultados son excepcionales y solo hay un pequeño cúmulo de material termoplástico que se debe a enfriamiento repentino cuando el material en estado maleable se pone en contacto con el vértice de la cara 3.

Resultados cuantitativos.

A [mm]	B[mm]	C[mm]	D[mm]
24.5	33	23	37

		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
5	5 mm	1.05	1.05	0.92	1.07
	10 mm	0.85	0.82	0.68	0.92
	15 mm	0.83	0.81	0.68	0.86
	20 mm	0.81	0.78	0.69	0.84
	25 mm	0.81	0.76	0.7	0.83
	30 mm	0.8	0.75	0.7	0.82
	35 mm	0.8	0.74	0.7	0.81
	40 mm	0.73	0.72	0.66	0.79
	45 mm	0.7	0.68	0.63	0.71
	50 mm	0.63	0.61	0.57	0.64

4.4.2.3 Ensayo 6

Este ensayo corrobora la teoría de que a partir de 8° de inclinación en los moldes se consiguen resultados óptimos.

1. $\beta=10^\circ$ h=50mm
2. Vértices 1 y 3 ligeramente desbastados. Vértices 2 y 4 R=0.75[mm]
3. Liberación inmediata

Resultados cualitativos.

La pieza se coloca en el hueco de la zona de moldes, situada de manera bastante céntrica, la posición favorece la uniformidad del espesor en el ensayo.



Resultados cuantitativos.

A [mm]	B[mm]	C[mm]	D[mm]
23	35.5	19.5	32

		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
6	5 mm	0.93	1.04	0.95	1.03
	10 mm	0.89	0.87	0.71	0.89
	15 mm	0.89	0.84	0.71	0.86
	20 mm	0.91	0.83	0.72	0.86
	25 mm	0.91	0.82	0.75	0.85
	30 mm	0.89	0.81	0.75	0.82
	35 mm	0.86	0.82	0.72	0.81
	40 mm	0.83	0.81	0.74	0.79
	45 mm	0.78	0.76	0.69	0.73
	50 mm	0.69	0.66	0.61	0.63

4.4.3 Resultados de ensayos utilizando PE de 3mm

Las dos pruebas que se realizan con este material son suficientes para poder adquirir todos los resultados necesarios para su posterior análisis y obtención de conclusiones.

A continuación se describen los valores de los parámetros que se consideran como fijos a lo largo de las pruebas.

Al tratarse de un material más grueso, se concluye que es necesario más presión de vaciado para llevar a cabo la correcta reproducción del molde. Por lo que se opta por llevarlo a su límite admisible de vaciado de -0.9 bar.

La temperatura de trabajo según las propiedades del material es de aproximadamente $145 - 155^{\circ}\text{C}$ lo que equivale a aproximadamente unos 130s de exposición a la fuente de calor.

Por último, debido a su grosor, es necesario más tiempo de enfriamiento para poder manipular el ensayo y separarlo del molde.

4.4.3.1 *Ensayo con molde de Ureol de 8°*

1. $\beta=8^{\circ}$ $h=50\text{mm}$
2. Vértices acabados en chaflán $45^{\circ}\times 0.75[\text{mm}]$
3. Liberación por gravedad
4. Lubricado

Resultados cualitativos.

El contador se fijó a 130s sin embargo, transcurridos aproximadamente 65s la superficie del material se comienza a quemar y pierde por completo su propiedad de acabado superficial liso.

La liberación del molde se hizo por gravedad, es decir, no se tuvo que aplicar ningún tipo de fuerza externa para realizar la separación de molde y material termoplástico. El movimiento descendiente de la bandeja fue suficiente para que se consiguiera dicha separación.

A pesar de los resultados favorables de liberación, los resultados de calidad superficial por la superficie externa de la pieza fueron desastrosos. Según el proveedor el PE es un material adecuado para ser utilizado en procesos de termoconformado, sin embargo, al hacer la prueba con este material se puede

observar en la imagen que la máquina Formech Compac Mini tiene una temperatura de trabajo demasiado elevada y quema la superficie que está expuesta directamente a los calentadores.



Resultados cuantitativos.

A [mm]	B[mm]	C[mm]	D[mm]
22	28	16.5	13.5

		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
1	5 mm	2.36	2.91	2.63	2.9
	10 mm	2.04	2.64	2.62	2.87
	15 mm	2.04	2.64	2.35	2.81
	20 mm	2.41	2.6	2.3	2.74
	25 mm	2.53	2.7	2.22	2.7
	30 mm	2.6	2.81	2.26	2.67
	35 mm	2.78	2.79	2.14	2.7
	40 mm	2.87	2.84	2.21	2.64
	45 mm	2.74	2.75	2.18	2.61
	50 mm	2.51	2.49	2.1	2.4

4.4.3.2 Ensayo con molde de arcilla de 10°

1. $\beta=10^\circ$ h=85mm
2. Vértices acabados en filos
3. Liberación por rotura de pieza
4. No lubricado

Resultados cualitativos.

A simple vista se verifica que el material no es útil para el termoconformado, pues deja una calidad superficial malísima. Pequeñas roturas y cavidades a lo largo de todo el área exterior.



La liberación es imposible sin romper la pieza con ayuda de una herramienta.

Resultados cuantitativos.

A [mm]	B[mm]	C[mm]	D[mm]
22.5	32.5	22.4	33

		10°			
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
1	5 mm	2.01	2	2	2.65
	10 mm	1.54	0.87	1.02	2
	15 mm	1.13	0.92	0.9	1.5
	20 mm	1.24	0.86	0.85	1.36
	25 mm	1.52	1.06	0.7	1.52
	30 mm	1.48	1.11	0.62	1.28
	35 mm	1.52	1.21	0.97	1.48
	40 mm	1.51	1.44	1.15	1.85
	45 mm	1.56	1.63	1.27	1.79
	50 mm	1.88	1.99	1.49	2.02
	55 mm	1.91	2.1	1.8	2.19
	60 mm	2.01	2.19	2	2.19
	65 mm	2.07	2.21	2.03	2.34
	70 mm	1.97	2.26	2.08	2.26
	75 mm	1.83	2.13	2	2.25
	80 mm	1.84	2.01	2	2.54
85 mm	1.82	1.95	1.95	2.04	

4.4.5 Resultados de ensayos con PMMA

Al no tratarse del material base, se realizan menos pruebas. También influye el factor de disponibilidad del material.

A pesar de ser pocos los ensayos que se realizan con este material, de los resultados obtenidos se pueden sacar conclusiones bastante efectivas.

A continuación se describen los parámetros fijos que se utilizan en los ensayos.

El tiempo de exposición a la fuente de calor se fijó en un principio como 130s, sin embargo se redujo a 110s por no dañar la máquina a mitad del primer ensayo debido a la aparición de humo.

Se utiliza la máxima presión de vaciado de la máquina debido a que se trata de un material más grueso muy duro, a pesar de pasar a un estado de transición viscoso, no fluye con igual facilidad que el resto de los materiales.

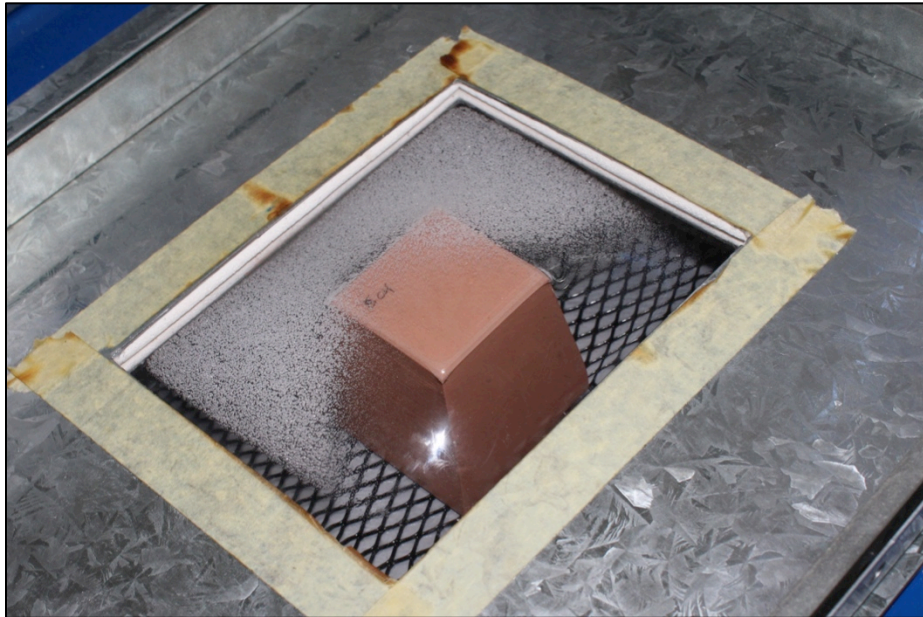
El tiempo de enfriamiento fue variable en la utilización de este material.

4.4.5.1 *Ensayo 1*

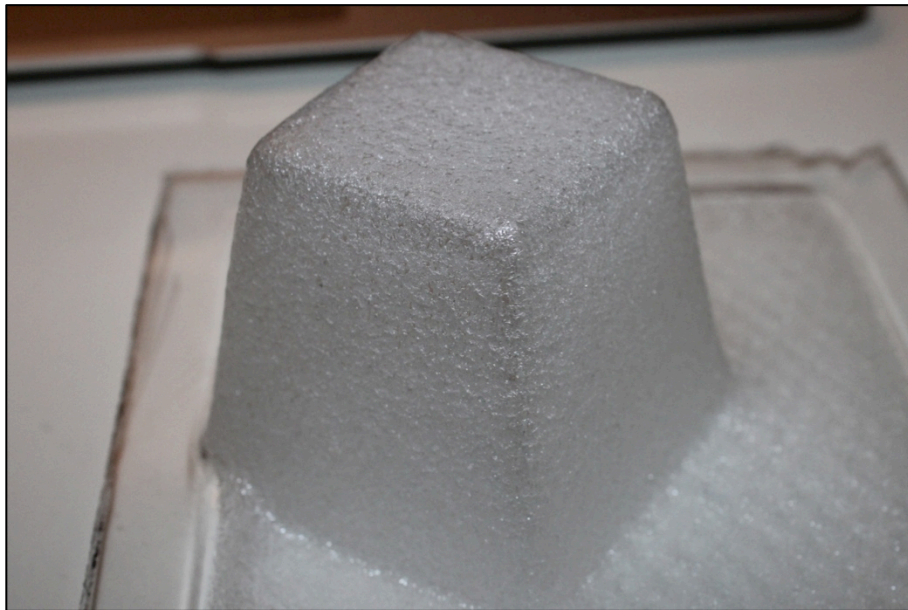
1. $\beta=8^\circ$ $h=50\text{mm}$
2. Vértices acabados en chaflán $45^\circ \times 0.75[\text{mm}]$
3. Liberación por gravedad
4. Lubricado
5. Tiempo de enfriado = 30s

Resultados cualitativos.

Al ser un material que no se había utilizado en ninguna de las pruebas anteriores se estuvo observando detenidamente el proceso de calentamiento. El contador se fijó a 130s, una cantidad de tiempo aproximada teniendo en cuenta el grosor del material y la temperatura necesaria para que llegara a ser termoconformable el material. Sin embargo, pasados 62s se empieza a quemar la superficie completa del material y aparecen pequeña burbujas de aire causadas por la alta temperatura, a pesar de esto seguía sin ser termoconformable.



Transcurrido este tiempo, el material adquiere la propiedad de ser termoconformable pero pierde la propiedad de transparencia.



Los resultados en cuanto a liberación son positivos, con el simple descenso de la bandeja se separó el molde del material termoplástico. A simple vista y tacto hay uniformidad en el grosor y no se producen disminuciones repentinas en las paredes laterales, ni siquiera en aquellas más próximas a los bordes de la ventana reductora.

4.4.5.2 Ensayo 2

1. $\beta=5^\circ$ h=50mm
2. Vértices acabados en chaflán $45^\circ \times 0.75$ [mm]
3. Liberación en estado semi-maleable
4. Lubricado
5. Tiempo de enfriado = 20s

Resultados Cualitativos

El material termoplástico es calentado durante 100s y se origina el mismo defecto del primer ensayo con este material. La superficie exterior se convierte enteramente porosa pero, los poros no atraviesan el material en su totalidad por lo que se puede considerar que la pieza es parcialmente aprovechable.

Se intentó liberar el molde de la pieza tras un tiempo prudente de enfriamiento pero resultó imposible realizar la separación a no ser que el material estuviera aún en un estado semi-elástico, es decir, una temperatura poco menor que la de termoconformado. Esto se debe a que cuando se enfría este material en particular se contrae y se endurece mucho; cualquier fuerza que se realice posteriormente sobre la pieza causa una rotura por fragilidad. Se puede observar en la imagen un ejemplo de esto.



El defecto de grosor de la cara tres es más apreciable debido a que se sigue produciendo pero en proporción a su grosor.

Resultados cuantitativos.

A [mm]	B[mm]	C[mm]	D[mm]
20.1	31.8	21.2	31

		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
2	5 mm	2.5	2.39	2.61	2.76
	10 mm	2.11	2.34	1.96	2.2
	15 mm	2.01	2.29	1.88	2.35
	20 mm	1.96	2.3	1.84	2.21
	25 mm	2.07	2.21	1.85	2.3
	30 mm	2.17	2.24	1.84	1.98
	35 mm	2.09	2.47	1.91	2.03
	40 mm	2.01	2.47	1.7	1.9
	45 mm	1.95	2.42	1.67	1.76
	50 mm	1.95	1.48	1.6	1.68

4.4.5.3 Ensayo 4

1. $\beta=3^\circ$ h=50mm
2. Vértices superiores ligeramente desbastados
3. Liberación en estado semi-maleable
4. Lubricado
5. Tiempo de enfriado = 20s

Resultados cualitativos.

Se consigue la liberación, pero de nuevo cuando el material se encuentra en un estado bastante caliente. Se intenta compensar la colocación del molde para que no haya deformación por el canal de vaciado pero por encontrarse tan cerca del borde, se producen defectos bastante destacables.



Resultados cuantitativos.

A [mm]	B[mm]	C[mm]	D[mm]
0	37	31.5	27.5

		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
4	5 mm	2.43	2.26	1.98	2.39
	10 mm	2.87	2.3	2.04	2.39
	15 mm	2.77	2.23	1.73	2.15
	20 mm	2.48	2.27	1.52	2.24
	25 mm	2.75	2.32	1.46	2.26
	30 mm	2.68	2.45	1.42	2.36
	35 mm	2.62	2.53	0.84	2.34
	40 mm	2.61	2.27	0.8	2.36
	45 mm	2.39	2.3	1.03	2.57
	50 mm	2.55	2.15	2.06	2.81

4.4.6 Resultados de ensayos utilizando HIPS de 1mm

Al tratarse de una serie de ensayos que utilizan un material ya utilizado pero con distinto grosor, los parámetros de trabajo cambian.

El proveedor de la máquina Formech Compac Mini recomienda un tiempo de calentamiento de aproximadamente 30s, sin embargo, teniendo en cuenta que en el caso de otros materiales sobreestima este valor, se prueban con valores de exposición más bajos hasta que se llega al óptimo.

De forma análoga se llega a hallar el valor de la presión de vacío ideal, partiendo de la referencia de la presión que se utiliza para el mismo material pero con grosor de 1.5mm. Se reduce un poco el valor a aproximadamente -0.6 bar y resulta dar una definición bastante favorable.

En el resto de factores que influyen, lubricación, tiempo de enfriado, etc. Se toma como referencia lo obtenido con los ensayos del mismo material de mayor grosor.

4.4.6.1 Ensayo 1

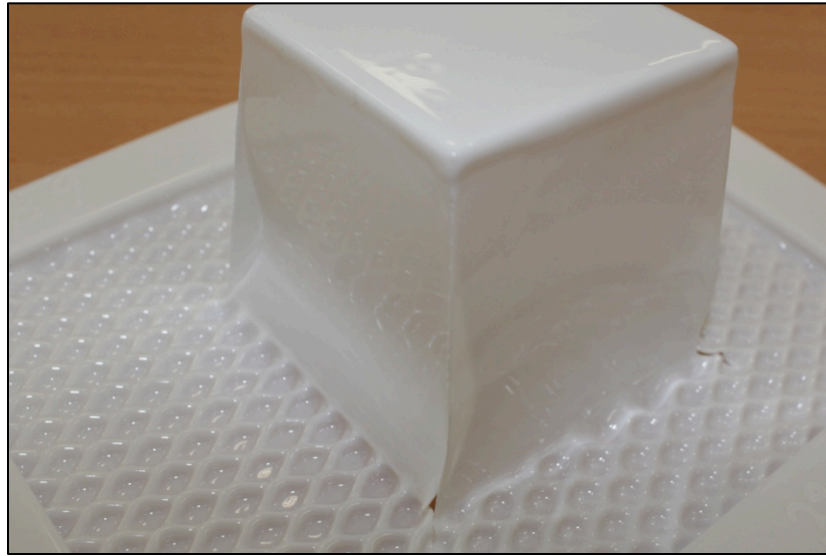
Se parte de la referencia que se tenía para el mismo material con 1.5mm de grosor, sabiendo que se libera sin necesidad de estar lubricado. Sin embargo, se realiza la prueba con lubricación en exceso.

Es una prueba destacable porque cambia el valor mínimo de inclinación necesario en paredes para poder producirse una liberación inmediata sin destruir la pieza.

1. $\beta=3^\circ$ y $h=50\text{mm}$.
2. Tiempo de calentamiento: 25s
3. Acabado de vértices ligeramente desbastados
4. Liberación con roturas
5. -0.6 bar
6. Tiempo de enfriado = 20s

Resultados cualitativos.

No se consigue una liberación de la pieza sin causar una destrucción parcial. Los vértices siguen siendo demasiado afilados para que el material no se rompa por esas zonas.



Resultados cuantitativos.

A [mm]	B[mm]	C[mm]	D[mm]
25	34.25	22.8	38.7

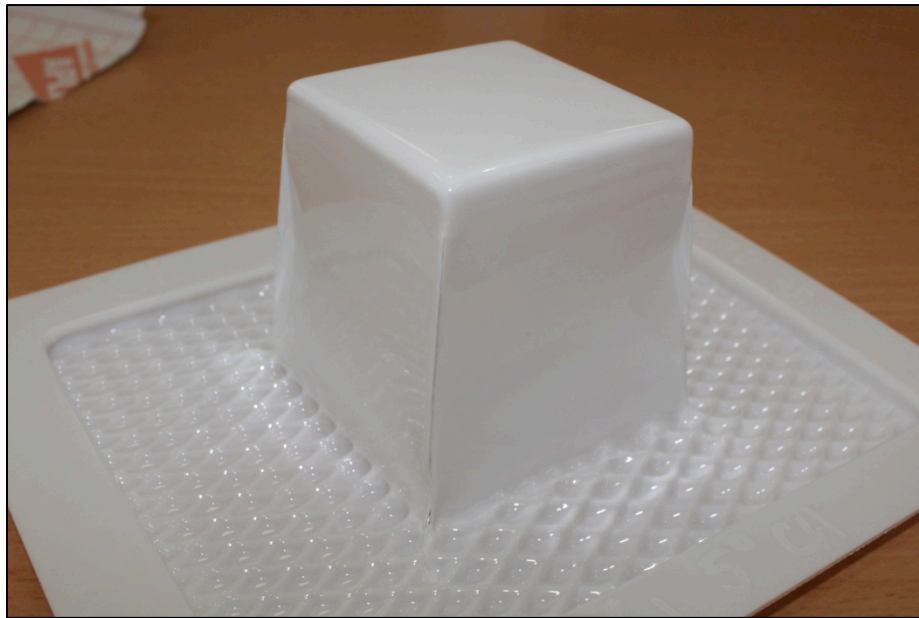
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
1	5 mm	0.77	0.73	0.74	0.78
	10 mm	0.55	0.51	0.63	0.59
	15 mm	0.51	0.51	0.46	0.52
	20 mm	0.51	0.5	0.47	0.5
	25 mm	0.51	0.47	0.49	0.48
	30 mm	0.49	0.49	0.5	0.47
	35 mm	0.47	0.46	0.5	0.46
	40 mm	0.46	0.44	0.49	0.45
	45 mm	0.43	0.43	0.47	0.43
	50 mm	0.37	0.38	0.44	0.29

4.4.6.2 Ensayo 3

1. $\beta=5^\circ$ y $h= 50\text{mm}$.
2. Tiempo de calentamiento: 25s
3. Vértices superiores acabados en chaflanes $45^\circ \times 0.75[\text{mm}]$
4. Liberación con roturas
5. -0.6 bar
6. Tiempo de enfriado = 20s

Resultados cualitativos.

En comparación con el material de grosor de 1.5mm hay un gran cambio; el mínimo ángulo que tiene que tener una pieza para que se pueda liberar sin lubricación cambia. En este caso no hay una liberación inmediata y es necesario romper el material para separar pieza y molde. Se repite la aparición de arrugas en la base de todos los vértices laterales. Es también apreciable la deformación repetitiva de la cara 3.



Resultados cuantitativos.

A [mm]	B[mm]	C[mm]	D[mm]
24.1	27.25	22.75	34.2

		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
3	5 mm	0.7	0.78	0.76	0.75
	10 mm	0.55	0.53	0.51	0.58
	15 mm	0.53	0.53	0.4	0.57
	20 mm	0.52	0.5	0.43	0.53
	25 mm	0.52	0.49	0.46	0.49
	30 mm	0.5	0.49	0.49	0.52
	35 mm	0.52	0.47	0.46	0.47
	40 mm	0.51	0.46	0.45	0.43
	45 mm	0.44	0.43	0.4	0.36
	50 mm	0.39	0.36	0.4	0.31

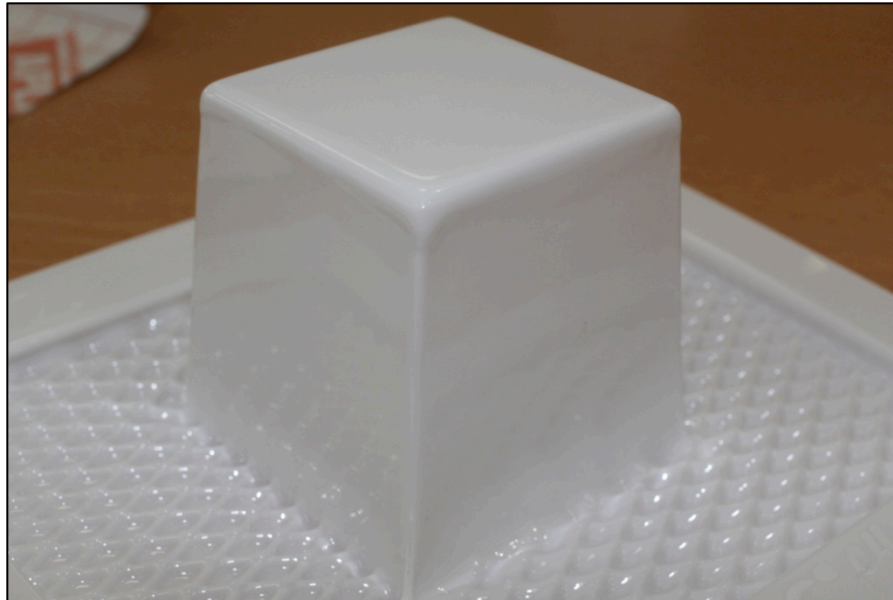
4.4.6.3 Ensayo 4

1. $\beta=5^\circ$ y $h= 50\text{mm}$.
2. Tiempo de calentamiento: 25s
3. Vértices superiores acabados en chaflanes $45^\circ \times 0.75[\text{mm}]$
4. Liberación inmediata
5. -0.6 bar
6. Tiempo de enfriado = 20s

Resultados cualitativos.

Se coloca el molde más cerca del borde 1 de la ventana reductora en comparación con el resto de los ensayos. Se produce una liberación inmediata. Hay aparición de arrugas, deformación ya repetitiva en moldes con ángulos de 5° o menos. A pesar de estar colocado el molde más hacia el borde 1, se repite el defecto de la cara 3.

Este ensayo marca el punto en el que se desmiente la primera hipótesis que establecía que el defecto de disminución de grosor originado en la cara 3 era debido a la posición respecto al borde de la ventana reductora.



Resultados cuantitativos.

A [mm]	B[mm]	C[mm]	D[mm]
19.5	37.5	29.2	38

		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
4	5 mm	0.76	0.79	0.79	0.72
	10 mm	0.44	0.5	0.63	0.57
	15 mm	0.41	0.5	0.43	0.48
	20 mm	0.43	0.49	0.47	0.53
	25 mm	0.45	0.48	0.48	0.52
	30 mm	0.46	0.46	0.47	0.49
	35 mm	0.47	0.43	0.48	0.48
	40 mm	0.45	0.43	0.48	0.45
	45 mm	0.42	0.42	0.48	0.4
	50 mm	0.39	0.37	0.45	0.35

4.4.6.4 Ensayo 6

1. $\beta=10^\circ$ y $h= 50\text{mm}$.
2. Tiempo de calentamiento: 25s
3. Vértices acabados en $R=0.75[\text{mm}]$
4. Liberación inmediata
5. -0.6 bar
6. Tiempo de enfriado = 20s

Este ensayo es destacable por poder considerarse el óptimo en la serie de este material. Presenta un espesor considerablemente uniforme a lo largo de su geometría completa.

Resultados cualitativos.

Hay una reproducción muy favorable exceptuando el defecto de la cara 3 debido al posicionamiento de la pieza.

Se consigue una liberación inmediata del molde.

Resultados cuantitativos.

A [mm]	B[mm]	C[mm]	D[mm]
20.1	38.25	27.6	33.75

		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
6	5 mm	0.72	0.71	0.71	0.76
	10 mm	0.59	0.55	0.49	0.62
	15 mm	0.59	0.54	0.45	0.63
	20 mm	0.59	0.53	0.48	0.61
	25 mm	0.61	0.52	0.52	0.6
	30 mm	0.6	0.5	0.53	0.59
	35 mm	0.55	0.49	0.53	0.55
	40 mm	0.57	0.47	0.46	0.55
	45 mm	0.55	0.45	0.45	0.52
	50 mm	0.5	0.38	0.37	0.45

5 CAPÍTULO V. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

5.1 Introducción

En este apartado se analizan de manera detallada los resultados considerados en el *Capítulo IV* hasta llegar a una serie de conclusiones. Previamente se discuten los resultados de las medidas de los grosores siguiendo el orden que se ha seguido en dicho capítulo. Están clasificados por material del molde y subdivididos en sus respectivos ensayos. Las discusiones van directamente seguidas de las conclusiones que se obtienen de cada serie de pruebas y, posteriormente, se incluye una serie de conclusiones generales sobre todo el proceso entero.

5.2 Discusiones y conclusiones de la variación de espesor lateral producido por termoconformado

La interpretación y discusión de los resultados no se puede considerar de igual manera para todas las pruebas. Los moldes de arcilla que están hechos a mano son muy inexactos geoméricamente y es imposible que puedan proporcionar unos resultados a un nivel de calidad tal que el de los moldes de ureol.

Es por esto que se opta por realizar una lista de condiciones jerárquica con los diferentes factores que tienen que cumplir los distintos ensayos.

Hay una condición básica fundamental que será común para todos los ensayos, a pesar de ello se implantan más condiciones para distintas situaciones:

1. Para considerar que un ensayo es óptimo, es fundamental que la muestra presente uniformidad y poca variación entre el espesor a lo largo de sus correspondientes caras laterales.

2. Se considerará óptimo un ensayo en el que no se produzcan arrugas y a su vez cumpla con 1.
3. Se considerará óptimo un ensayo que se libere sin problemas del molde y cumpla a su vez con 2.

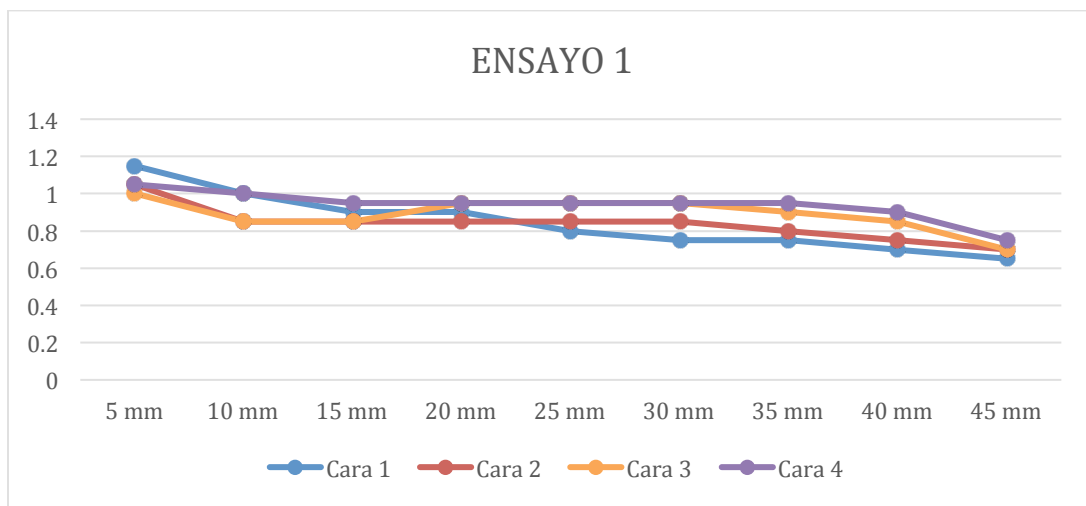
A continuación aparecen listados los distintos ensayos efectuados para la realización del TFG y con su correspondiente número condicionante.

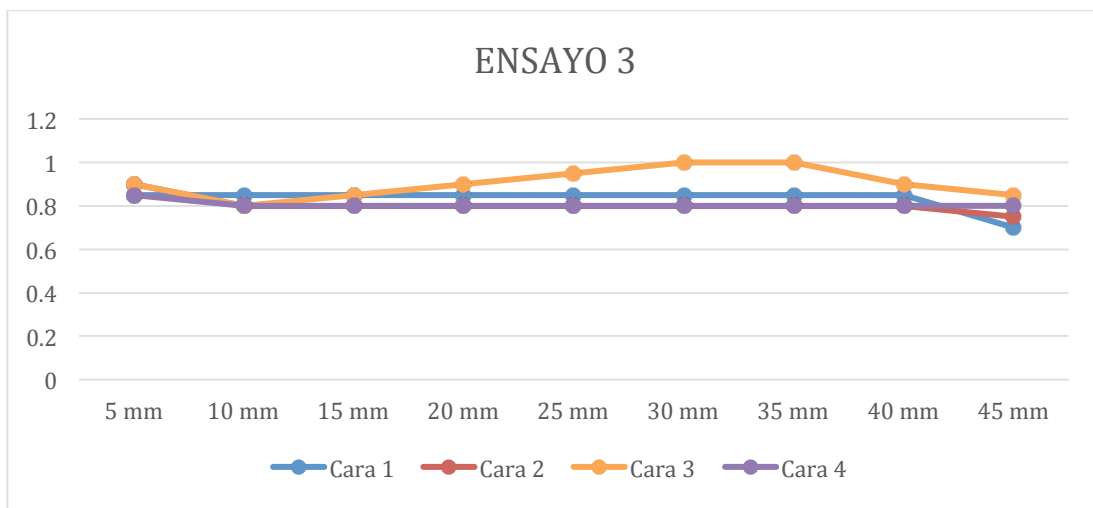
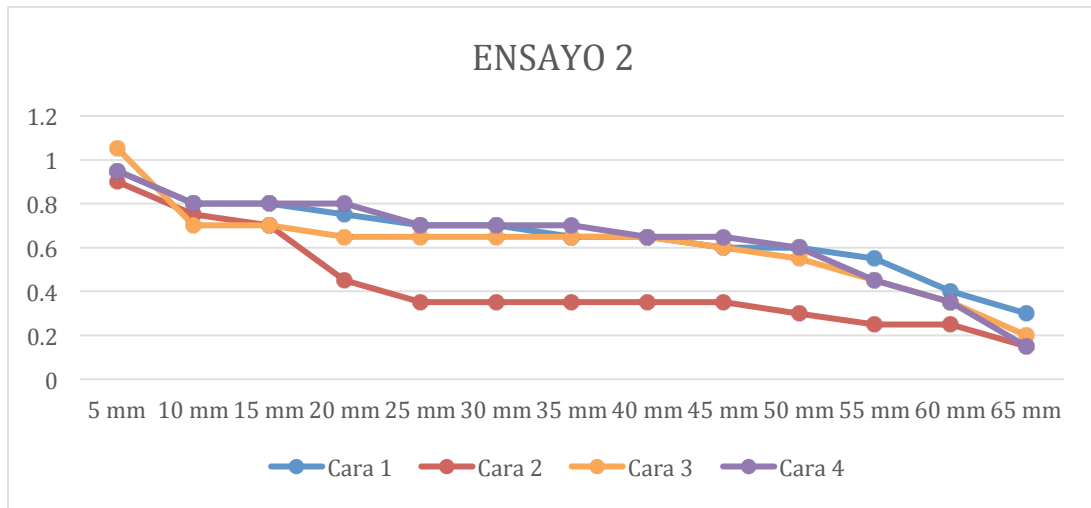
- **Moldes de arcilla**
 - *Ensayos de moldes en solitario: 1*
 - *Ensayos de dos moldes simultáneos: 2*
 - *Ensayos de moldes con plataformas: 3*
- **Molde de ureol**
 - *Ensayos de moldes lubricados: 3*
 - *Ensayos de moldes secos: 3*
 - *Ensayos en PE: 3*
 - *Ensayos en PMMA: 3*
 - *Ensayos en HIPS 1 mm: 3*

5.2.1 Moldes de arcilla

5.2.1.1 *Ensayos de moldes en solitario.*

Teniendo en cuenta la tabla de resultados de los tres ensayos de esta categoría es posible representarlos mediante gráficas que facilitan visualmente la apreciación de del valor de los espesores en cada punto. A continuación se muestran las correspondientes gráficas:





5.2.1.1.1 Discusiones de los resultados

Lo que se puede observar en estas gráficas es la tendencia que sigue la propagación del material durante el proceso de termoconformado plástico.

De la información que se muestra en el apartado 4.3.1 se observa que entre el ensayo 1 y 3 la única diferencia que hay es el acabado de los vértices de la cara superior del molde.

Ambos ensayos tienen resultados muy estables que difieren poco entre sí pero, aparentemente se puede contrastar con los resultados que el acabado de los vértices influye en la propagación de la primera parte del material.

Como se puede observar, en el *Ensayo 3* hay una tendencia excepcional, lo cual quiere decir que el estiramiento de la lámina se produjo de manera equitativa a lo largo de todas las paredes.

Los resultados tan variados que se obtienen en el segundo ensayo se deben a que hay una zona de enfriamiento inmediato que retiene el material y no lo estira correctamente. En la parte teórica de este TFG se menciona que estas imperfecciones suceden cuando la temperatura del molde es considerablemente menor que la de la lámina, ésta se enfría en las primeras zonas de contacto y pierde sus propiedades de flujo. Según información del proveedor de la máquina, estas imperfecciones pueden subsanarse aumentando la inclinación de las paredes laterales.

5.2.1.1.2 Conclusiones

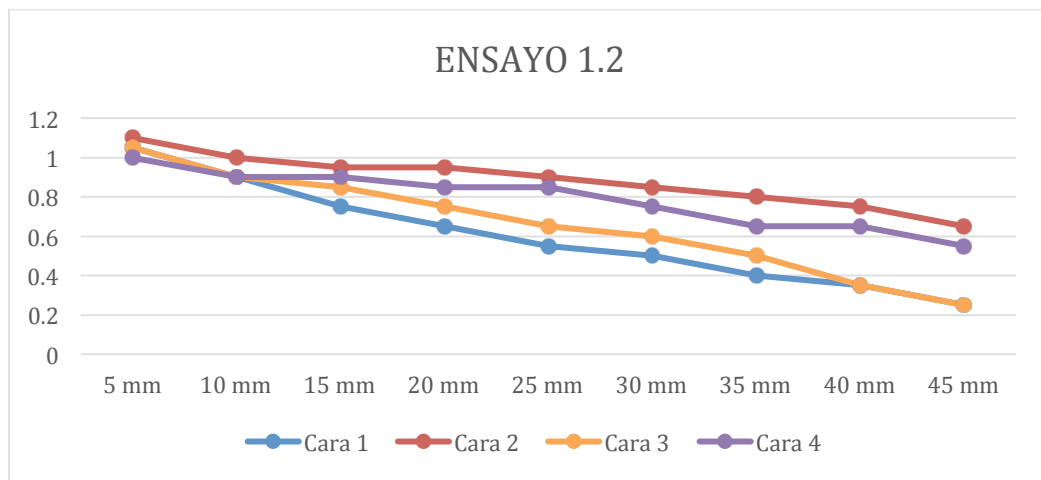
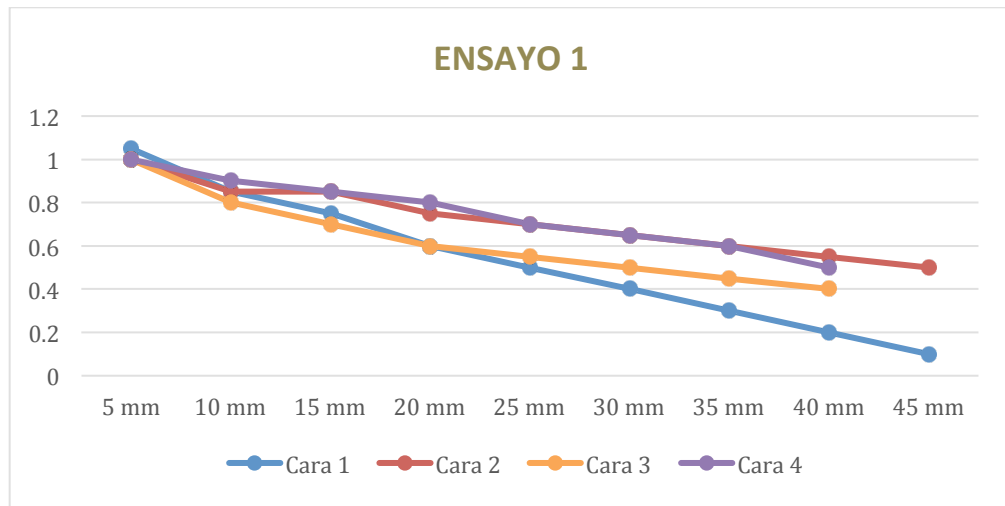
Recopilando toda la información obtenida de los ensayos se pueden obtener las siguientes conclusiones:

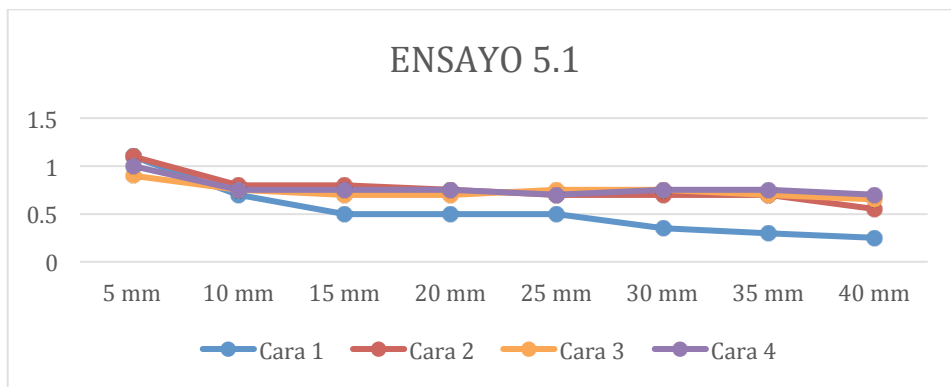
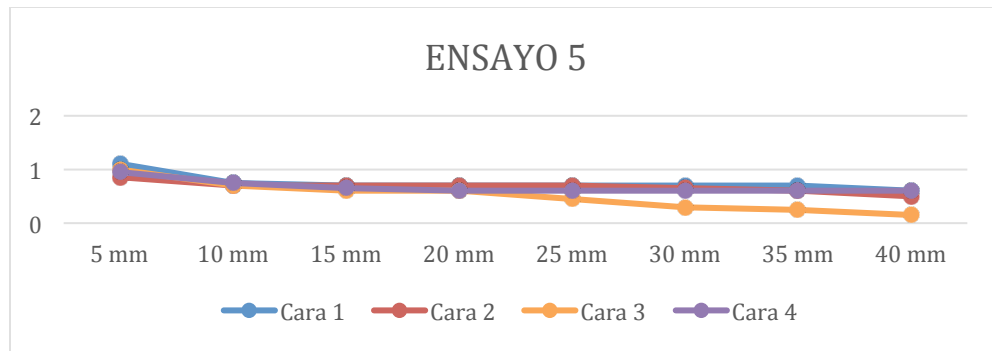
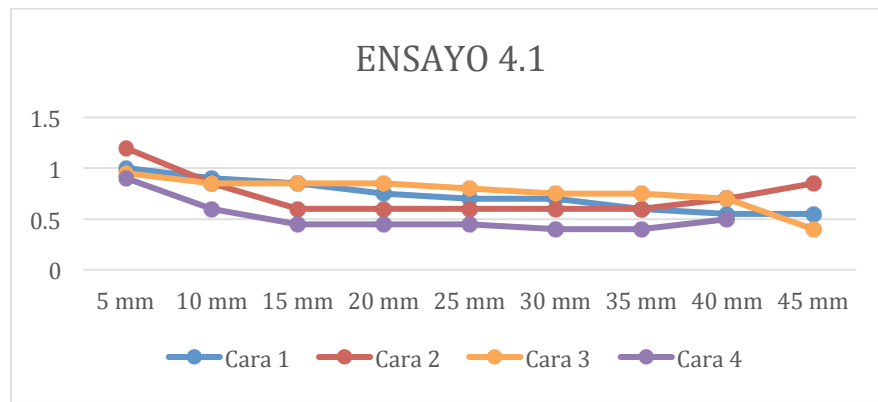
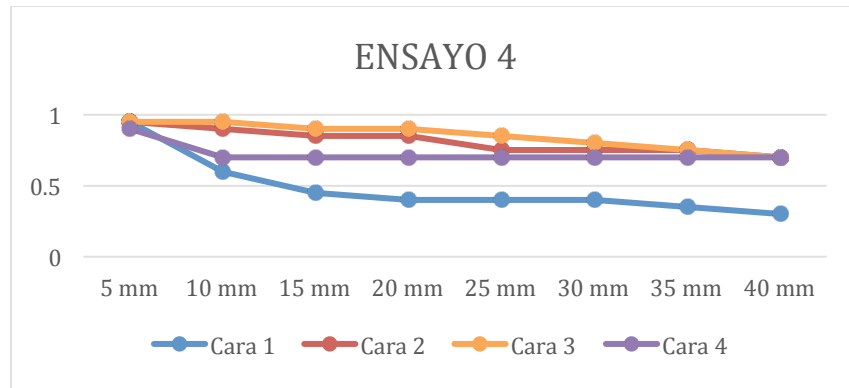
- A la hora de tener en cuenta el resto de parámetros que varían en la termoconformadora, es correcto llegar a la conclusión de que el acabado que se le da a los vértices condiciona directamente el estiramiento de material. Esto se contrasta con el primer ensayo, en el que se ve que hay un salto en el espesor los primeros 10mm de avance. Sin embargo, al cambiar la geometría de estos vértices en el *Ensayo 3* el material fluye de manera uniforme a lo largo de casi toda la geometría.
- El ángulo de inclinación de las paredes también afecta directamente el flujo del material, *Ensayo 2*. Es decir, a mayor inclinación en las paredes, mejor acabado de la pieza.
- El tiempo de exposición a la fuente de calor está dentro del rango óptimo de valores.
- La presión de vaciado de -0.8 bar resulta ser un poco alta debida a las pequeñas cantidades de material termoplástico que se escapa a través de la rejilla de la base del área del molde.
- De esta serie de ensayos, acorde con las condiciones impuestas, el *Ensayo 3* sería la prueba óptima. Debido a que es la que tiene el material repartido de manera más equitativa.

5.2.1.2 Ensayos con dos moldes simultáneos

En esta serie de pruebas se destacan dos subapartados, que son de ensayos con atrapa-arrugas y sin atrapa-arrugas.

A continuación las gráficas de los grosores de los ensayos considerados:





5.2.1.2.1 Discusiones

En esta serie de ensayos en el *Capítulo IV* se representan 5 pruebas, sin embargo, debido a la deformación extrema de una de ellas no se representa aquí los datos de las medidas.

- Ensayos sin atrapa-arrugas

De los datos se observan en el *Ensayo 1* que hay una tendencia a que exista una disminución del grosor de pared dependiente a la distancia a la que se encuentre situada de los bordes de la ventana reductora. Sin embargo, este ensayo es inútil puesto que no cumple con las condiciones implantadas. La arruga que se origina se debe a la poca distancia a la que se encuentran situados los moldes el uno del otro.

En cambio, el *Ensayo 5* muestra una uniformidad considerablemente buena, exceptuando una de las caras del molde de 10° de inclinación. En la imagen de la muestra se puede observar que la distancia entre el molde y el borde de la ventana reductora es muy pequeña.

Cabe a destacar del *Ensayo 5* que el acabado de los vértices es en chaflán, lo que corrobora a que benefician la propagación del material durante el proceso.

- Ensayos con atrapa-arrugas

En las imágenes del *Ensayo 2* se observa que utilizar un atrapa arrugas el tamaño de la mitad de un molde es inútil.

Los gráfica del *Ensayo 4* muestra bastante uniformidad y los moldes se liberaron inmediatamente pero se debió a que el proceso de vaciado no se realizó por completo.

5.2.1.2.2 Conclusiones

- Ensayos sin atrapa-arrugas

Se puede llegar a la conclusión de que la distancia a la que se sitúan los moldes influye sobre la aparición de arrugas en la pieza final. Sin embargo, a pesar de no formarse arrugas en la zona de la pieza que interesa, no resulta una buena idea realizar procesos de termoconformado con múltiples moldes sin atrapa arrugas utilizando la ventana reductora.

Es posible apoyar la hipótesis de la existencia de una dependencia entre el grosor de las paredes laterales de las piezas y la distancia a la que se encuentra la misma del borde de la ventana reductora.

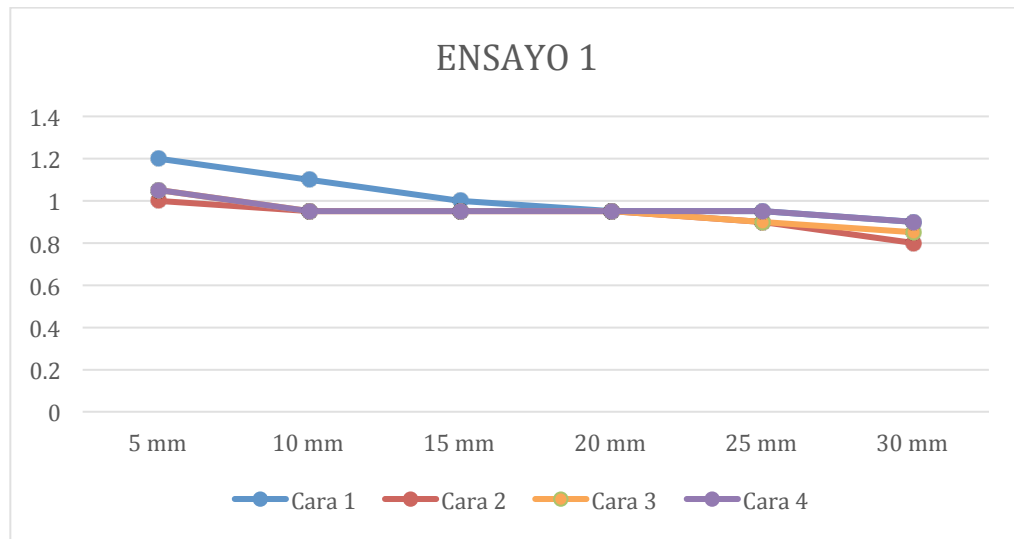
La pieza que se podría considerar cercana a un ensayo óptimo sería el *ensayo 5* por cumplir con la condición fundamental, sin embargo no se libera del molde sin romperse.

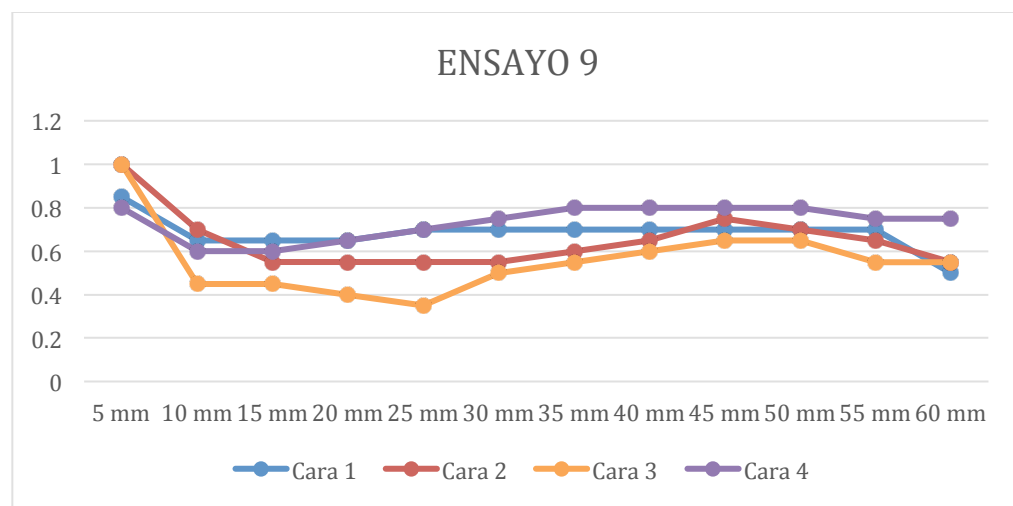
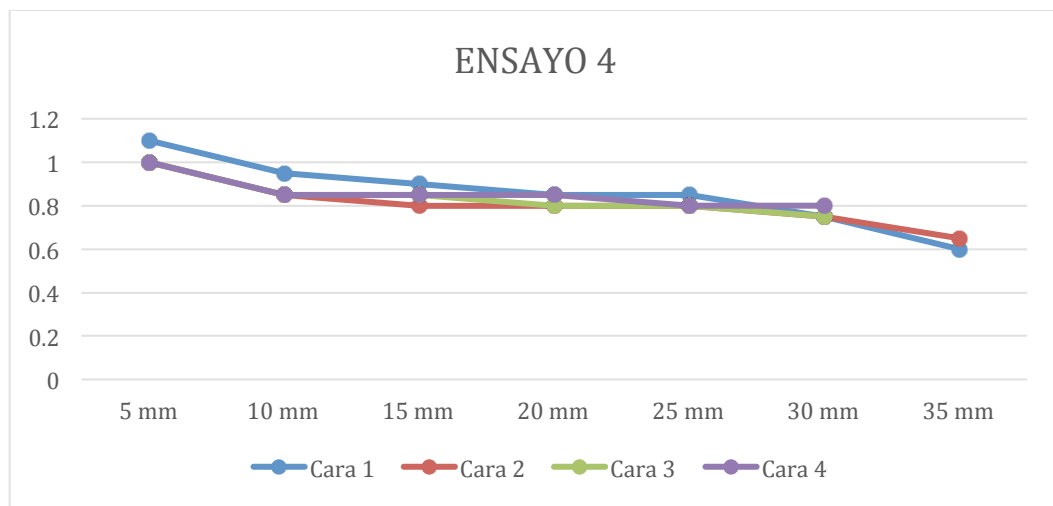
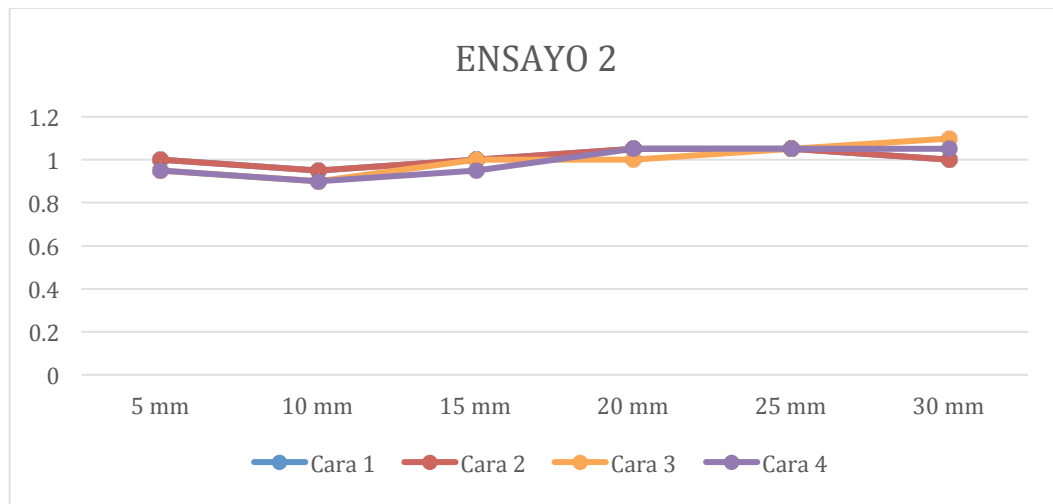
- Ensayos con atrapa-arrugas

En el *Ensayo 4* se hizo la prueba de dejar al sistema de vaciado llegar a su límite máximo, sin embargo, se determina que es demasiado alto la presión aplicada porque se produce una rotura en el material.

Teniendo en cuenta toda la información de los ensayos con atrapa-arrugas se puede determinar que a efectos prácticos, un atrapa-arrugas de tamaño menor de 10x10x10mm es el óptimo para conseguir que se pueda conformar con dos moldes en la ventana reductora. Con la condición ue se coloquen estrictamente como en los *Ensayos 4 y 7* con forma de “diamante” respecto al borde de la ventana reductora.

5.2.1.3 Ensayos de moldes con plataformas





5.2.1.3.1 *Discusiones*

Se puede observar en las gráficas que el uso de una plataforma beneficia en creces la tendencia que tiene el material a distribuirse uniformemente por los moldes.

Se observa que el *Ensayo 9* es el que presenta mayores irregularidades, se forman arrugas y hay una cara que sufre más delgadez en comparación con las otras, precisamente la 3.

Los otros tres ensayos son muy favorables a nivel de números. Sin embargo, cuando entran en juego el resto de condicionantes, se aprecia que el *Ensayo 1*, por no tener la plataforma pegada en su totalidad al molde, se forman roturas y pequeñas arrugas en las bases de los vértices laterales.

El *Ensayo 2* defiende la teoría de propagación uniforme gracias a chaflanes en los vértices superiores.

El ensayo óptimo es el 4 debido a que cumple con todas las condiciones impuestas, tanto de liberación inmediata, uniformidad en el estiramiento del material y la no aparición de deformaciones. Se puede fijar a partir del ensayo los valores de tiempo de exposición a la fuente de calor y presión de vacío.

5.2.1.3.2 *Conclusiones*

Se trabaja con un poco de menos tiempo de exposición del termoplástico a la fuente de calor y se consiguen resultados de estiramiento excepcionales.

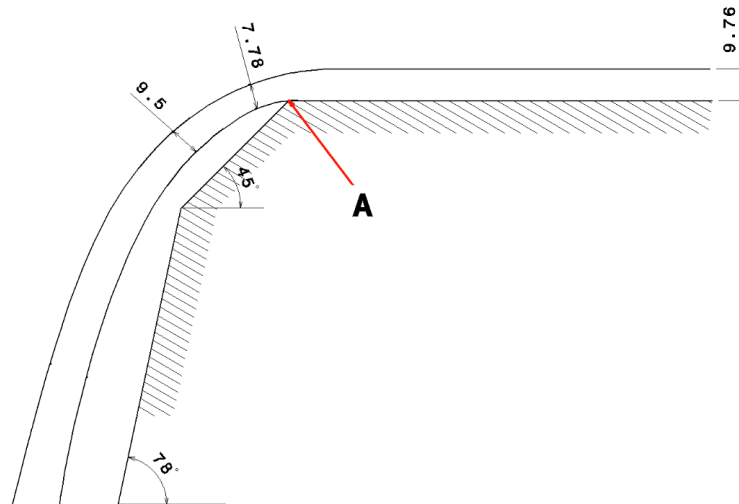
De manera análoga, se disminuye la presión de vacío a -0.7bar y dejan de aparecer zonas en las que el termoplástico atraviesa la rejilla de apoyo.

Se defiende de nuevo la teoría del reparto uniforme beneficiado por los chaflanes. Se hace de dos maneras, uno con el ensayo 2, que utiliza chaflanes y obtiene buenos resultados de propagación; y con el ensayo 4 que tiene vértices acabados en filos y retiene una cantidad mínima de material en la zona.

5.2.1.4 *Conclusiones generales para el trabajo con moldes de arcilla fabricados a mano*

A partir de los ensayos analizados en el apartado de moldes de arcilla, se obtienen las siguientes conclusiones por la repetitividad de los hechos.

- A mayor inclinación de las paredes de los moldes, más uniforme será el reparto del material durante el proceso de termoconformado siempre y cuando no se supere una relación existente entre el ángulo y la altura de la pieza en cuestión. Esto se debe en parte a lo que ocurre cuando la lámina se pone en contacto directo con una superficie horizontal. En el momento que se pone en contacto directo el material con el molde, se enfría y deja de estirarse. Es por esto que, a mayor inclinación, mejor reparto de espesor. El factor de la altura interviene a la hora del pre-estirado de la lámina, cuanto más se estire, más disminuirá su espesor.
- Si es necesario utilizar dos moldes cuando se utiliza la ventana reductora, es necesario equipar la bandeja de trabajo de dos atrapa-arrugas de aproximadamente 1 cm^3 y colocarlos de manera que formen un “diamante” respecto a los bordes de la ventana reductora.
- Se establece un tiempo óptimo de calentamiento para las láminas de HIPS de 1.5 mm de grosor de 34 s
- Se establece una presión de vaciado óptima de -0.7 bar .
- Los chaflanes benefician el reparto de material y evita la disminución repentina de espesor de material en los laterales cerca de la base superior. Las imágenes a continuación muestran los puntos de contacto inmediato en los que se enfría el material en un chaflán.



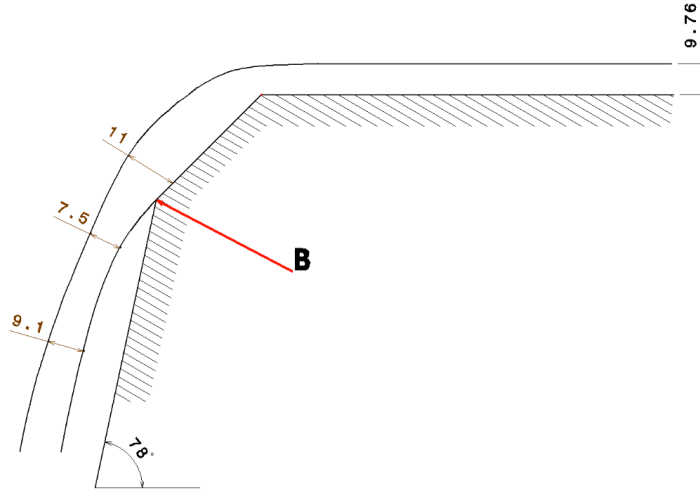
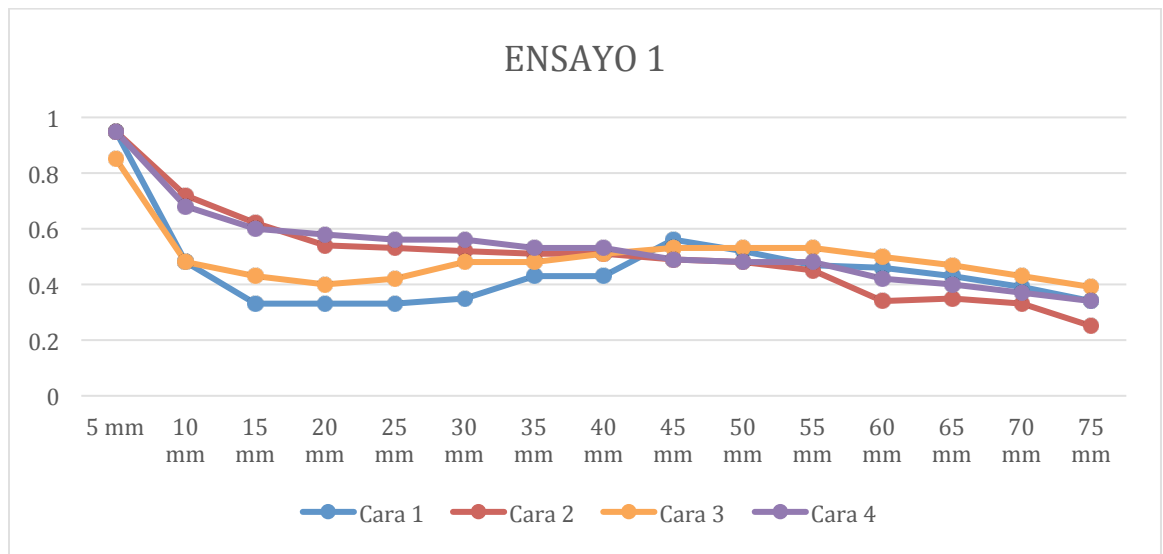
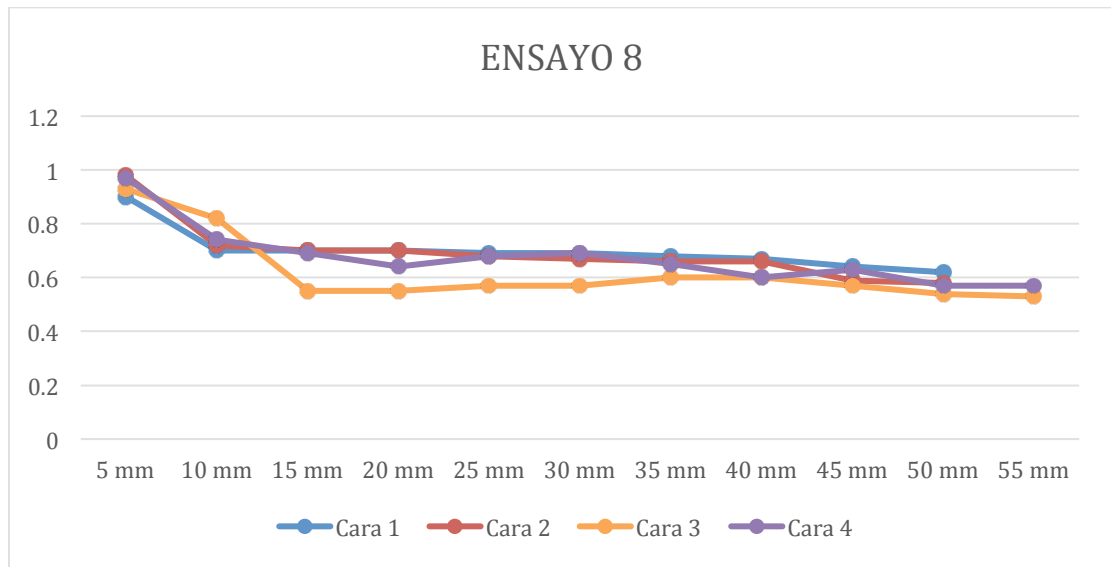
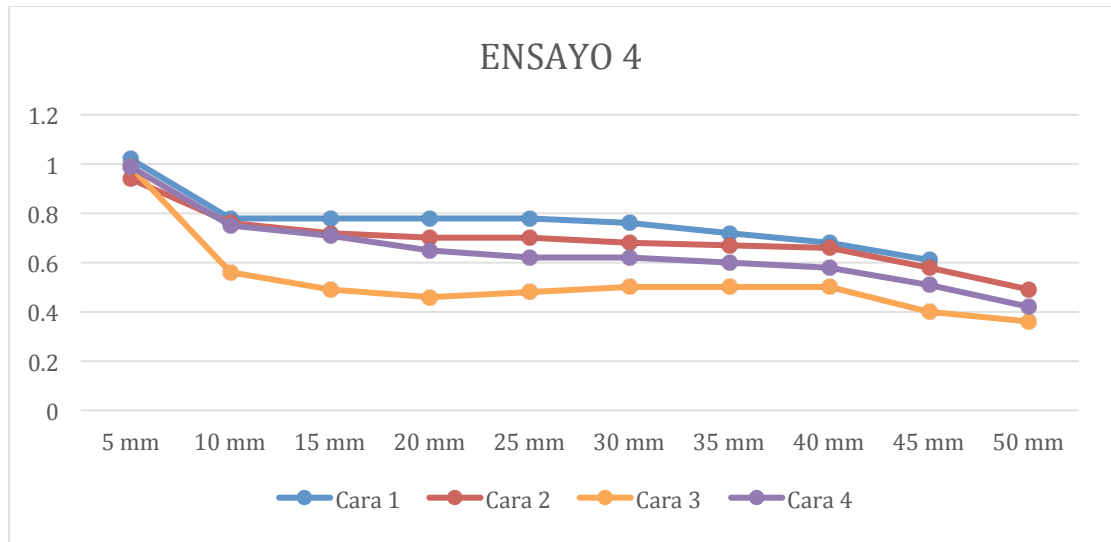


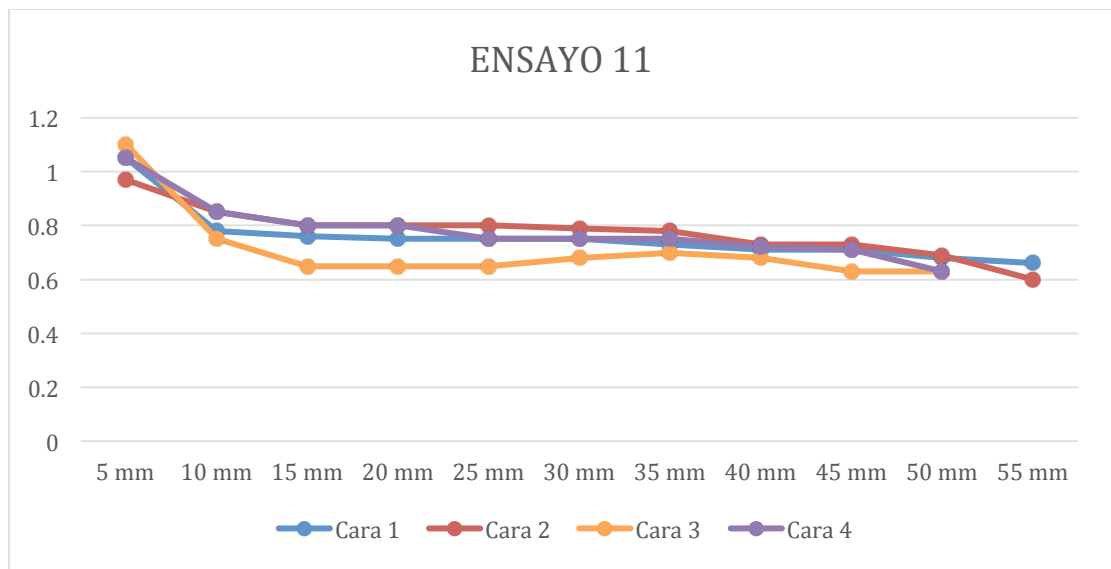
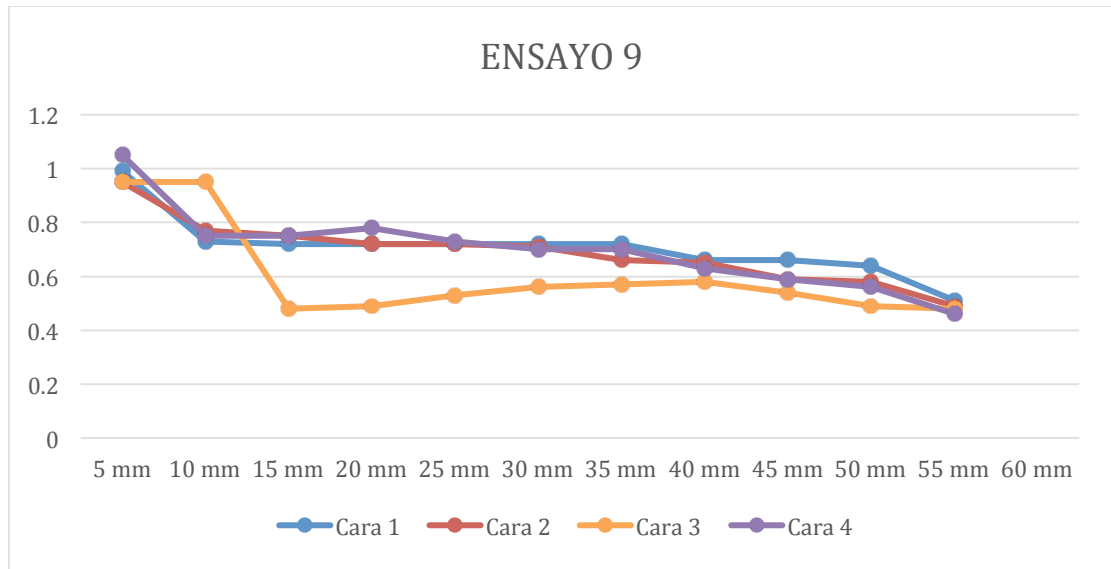
Figura 5-1. (a) primer punto de contacto que se enfría. (b) segundo punto de contacto.

5.2.2 Moldes de ureol

5.2.2.1 Ensayos de moldes lubricados







5.2.2.1.1 Discusiones

El *Ensayo 1* fue una prueba previa para ver qué ocurriría si se dejaba la base vertical en los moldes, claramente los resultados son desastrosos y se obtienen una pieza rota por la base.

En el *Ensayo 4* aparece una tendencia de crearse arrugas en las bases de las piezas con paredes que se acercan a una inclinación de 90° respecto a la horizontal.

Una tendencia que tienen todos los ensayos de este apartado es que los espesores de la cara 3 tienen disminuciones repentinas de sus espesores. Una

primera hipótesis que se formula es porque los moldes se colocan más cerca del borde 3 de la ventana reductora.

La grafica del *Ensayo 8* muestra la importancia del acabado de los vértices superiores, en este caso fueron ligeramente desbastados y se observa un cúmulo de material en la parte superior acompañada de una repentina disminución de espesor.

En el *Ensayo 11*, a pesar de estar dotado de chaflanes el vértice de la cara 3, se cumple la tendencia de que haya un espacio en el que disminuye el espesor más, en comparación con el resto de caras.

5.2.2.1.2 Conclusiones

Teniendo en cuenta la información obtenida de los resultados se puede llegar a la conclusión de que las arrugas que se originan en la base de algunas de las piezas de menor inclinación se debe a la relación de altura que existe entre ambas ya mencionada en los ensayos de arcilla.

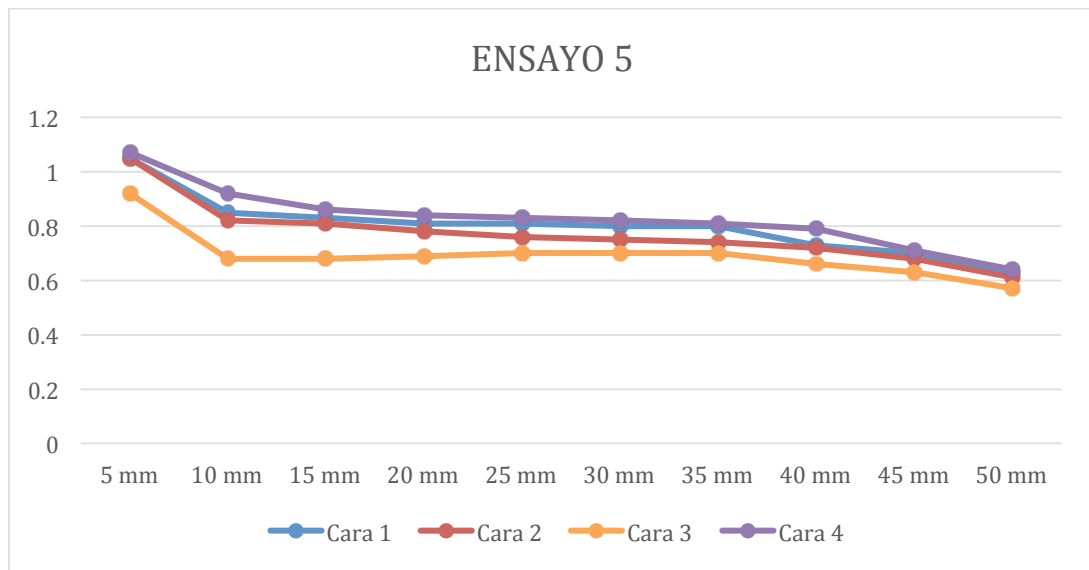
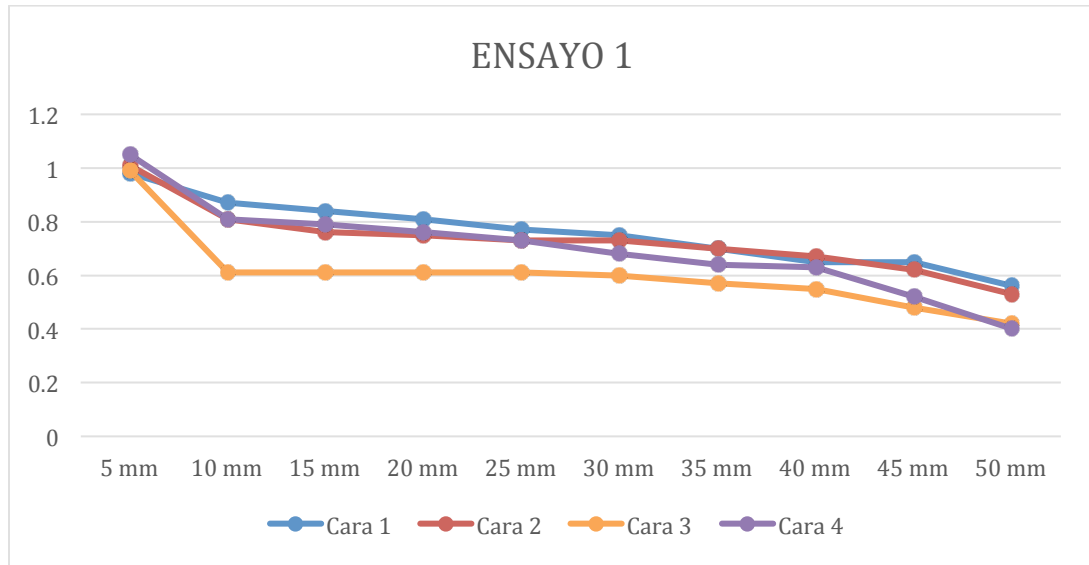
A partir del molde de 8° se está en la *zona segura* de la relación entre la altura e inclinación que hace que aparezcan arrugas en la base del molde.

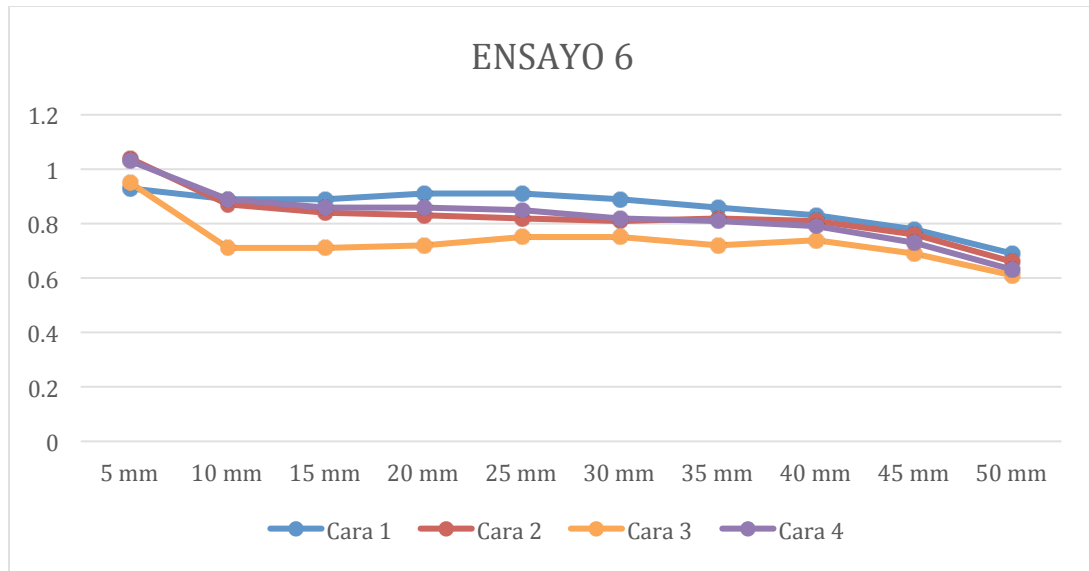
Se halla la mínima inclinación necesaria para liberar las piezas conformadas de los moldes cuando hay lubricación, 3° . Sin embargo no se trata de un ensayo óptimo por la formación de arrugas que se da cerca de la base de los vértices.

A partir de un ángulo de inclinación de paredes de 4° es indiferente que los vértices laterales tengan un acabado afilado, el material HIPS no se ve afectado y reproduce bien la pieza.

A pesar de que los ensayos 8, 9 y 11 cumplen con los requisitos de liberación inmediata, sólo el 8 y el 11 cumplen con el de la uniformidad del material. Sin embargo, se tiene que descartar el *ensayo 8* debido a que forma arrugas en su base. Por lo tanto, se establece que las condiciones de trabajo óptimas con moldes que presentan grandes precisiones de acabados; y que estén lubricados, son cuando hay una mínima inclinación de 8° y no contienen vértices superiores afilados.

5.2.2.2 Ensayos de moldes secos





5.2.2.2.1 Discusiones

En el primer ensayo se consigue una liberación inmediata con el mínimo grado de inclinación respecto a la vertical sin estar lubricado.

El ensayo corrobora la teoría de la relación entre altura e inclinación de las paredes mostrando repetividad en cada prueba formando pequeñas arrugas en la base.

A partir de una inclinación de 8° se observa que las diferencias son mínimas en cuanto a consistencia en los resultados.

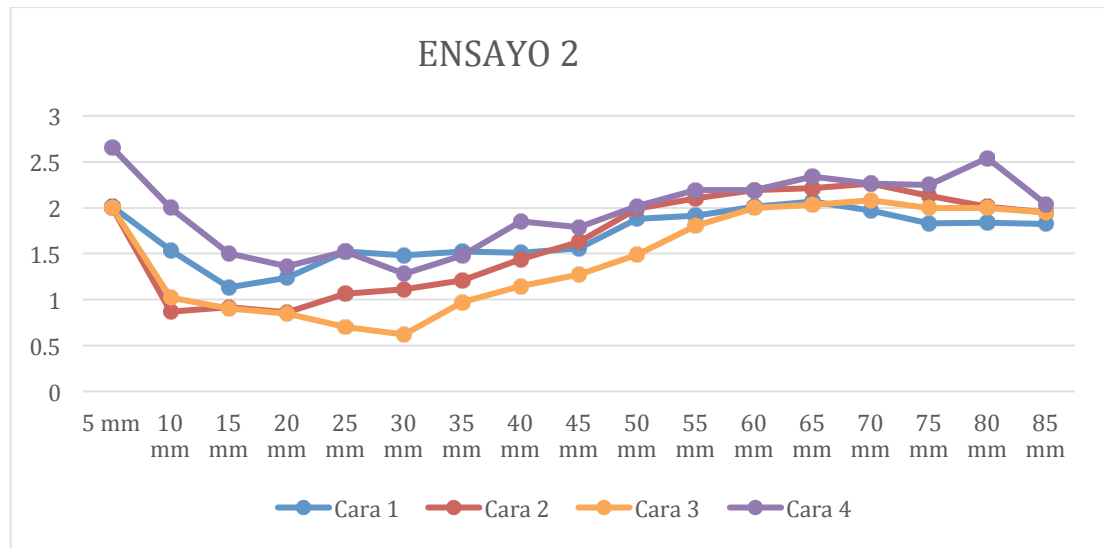
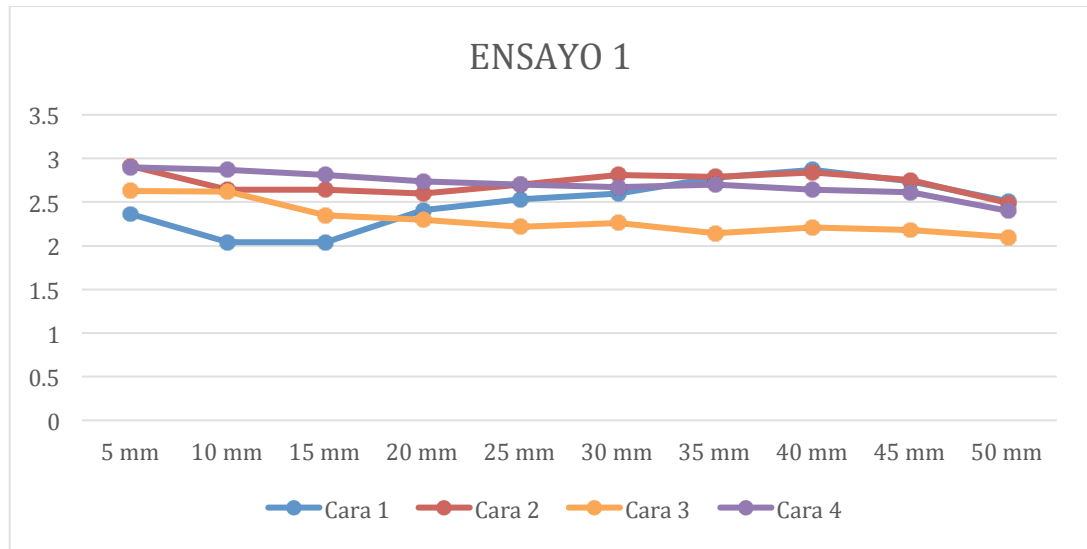
En esta serie de pruebas se repite la deformación sufrida por la cara 3 de las piezas finales, en los tres casos el molde está situado más cerca del borde 3 de la ventana reductora que del borde 1.

5.2.2.2.2 Conclusiones

Se confirma con el *Ensayo 6* que a partir de ángulos de inclinación de 8° utilizando los parámetros ya fijados, que se consiguen resultados óptimos siempre y cuando se tenga en cuenta el efecto que produce en el espesor de las paredes el hecho de estar más cerca de los bordes de las ventanas reductoras.

5.2.2.3 Ensayos PE de 3mm de grosor

En esta serie de ensayos se recurre a la utilización de un molde de arcilla no lubricado y otro de ureol lubricado. Al realizar las discusiones y conclusiones de este apartado, se compararán ambos resultados pero no se tendrá en cuenta el molde de arcilla para las conclusiones generales del apartado 5.2.2.



5.2.2.3.1 Discusiones

Al tratarse de un material nuevo, que no se había utilizado en ninguna de las otras pruebas había que estudiar previamente cuál serían los valores de los parámetros de usos óptimos para poder trabajar con él. Como ya se mencionó en el apartado de resultados, se determinó el tiempo aproximado

teórico al que tenía que estar expuesto el material, sin embargo en la práctica difirió y resultó ser menor porque se corría el riesgo de estropear la máquina termoconformadora.

A pesar de tener un malísimo acabado la pieza, en el *Ensayo 1* presenta bastante uniformidad en los resultados siendo la variación mayor entre valores de aproximadamente el 35% de su espesor, una cifra bastante cercana a aquellas que se presentan en el material HIPS.

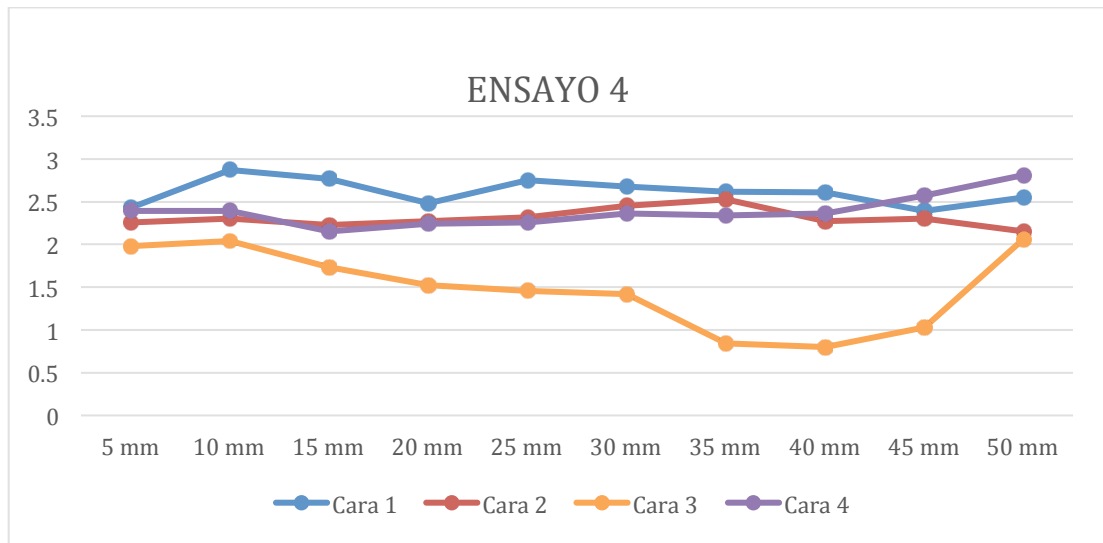
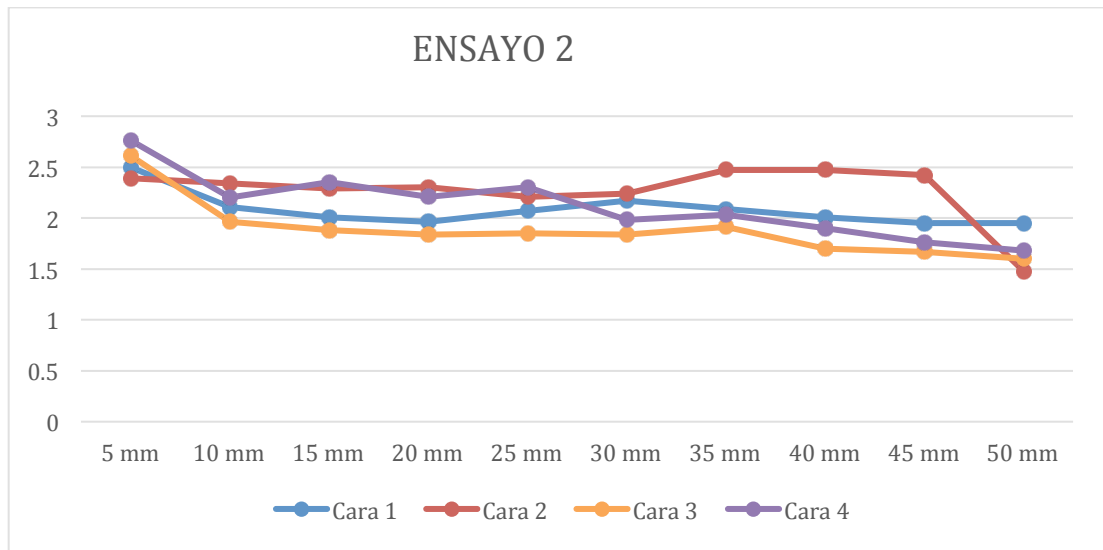
La relativa uniformidad que presenta la pieza se debe a que el molde con el que se trabaja tiene sus vértices de la cara superior acabados en chaflanes.

En cambio, el ensayo que se utiliza arcilla como molde, los vértices están acabados en filo, y la poca precisión geométrica que se tiene al utilizar un molde hecho a mano influye mucho en que se reparta bien el material a lo largo de las paredes. Como añadido, no se consiguió llegar a la temperatura idónea de trabajo. Hecho que resulta en que el material se estire “a trozos” por no encontrarse en un estado completamente maleable, o bien, lo que se conoce como su *ventana de termoconformado*.

5.2.2.3.2 Conclusiones

Aunque el proveedor de la máquina termoconformadora indica que sí es un material viable para el proceso, se llega a la inmediata conclusión de que el material no sirve debido a su mala calidad superficial tras el proceso de calentamiento. Se forman poros del orden de milímetros que aunque no llegan a atravesar el material, perjudica las propiedades mecánicas (lo hace menos resistente) del material.

5.2.2.4 Ensayos PMMA de 3mm de grosor



5.2.2.4.1 Discusiones

De nuevo, los parámetros variables eran desconocidos para este material. Se llegó a determinar un tiempo de exposición para el calentamiento de 130s que se terminó acortando por la aparición de humo. El tiempo de exposición que se utilizó en el primer ensayo fue el que se utilizó como referencia para el resto, 110s.

En el caso de la primera prueba con el molde de 8° no hay inconvenientes y se produce una liberación por gravedad del molde. No presentaba

deformaciones muy notables en cuanto a uniformidad en las paredes con la excepción de la tendencia que aparece en todas las pruebas en la cara 3.

Teniendo en cuenta todos los datos de los resultados hay que añadir que el material presenta mala calidad superficial con la aparición de pequeños poros por el calor.

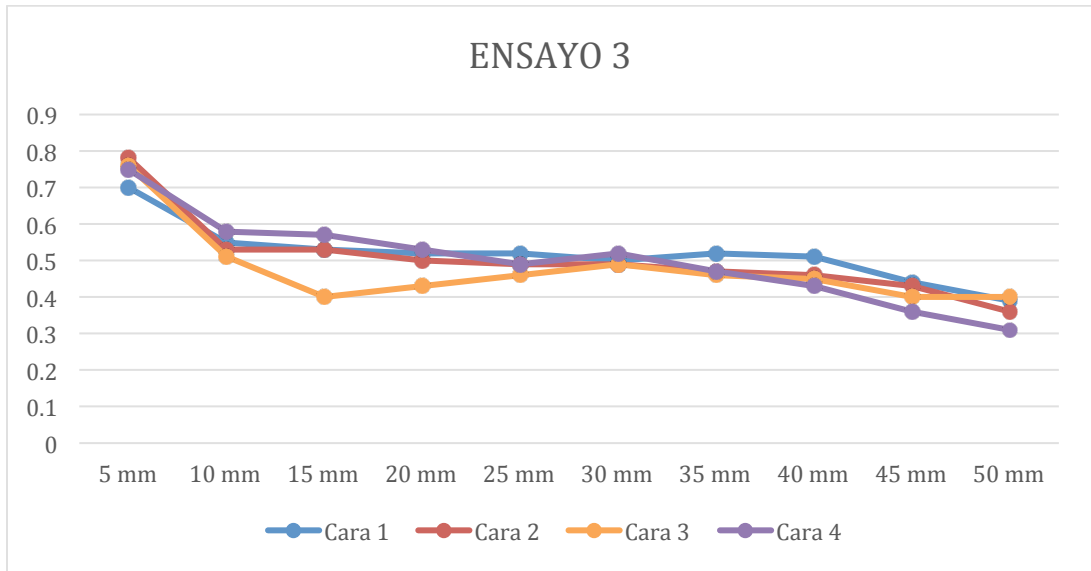
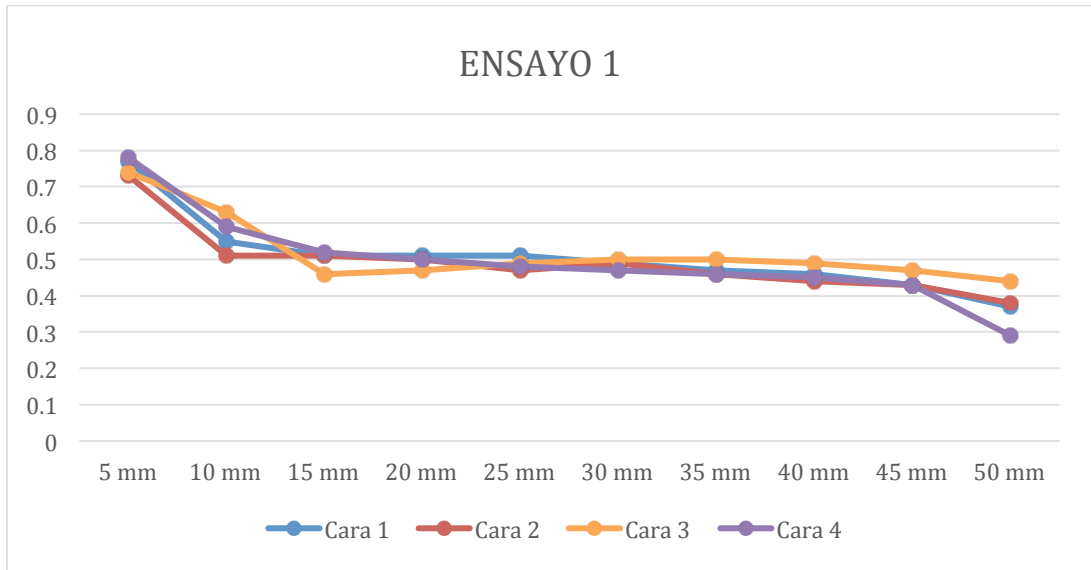
Resulta casi imposible determinar un tiempo de enfriamiento prudente para poder separar el molde porque en el momento que se solidifica el material resulta imposible realizar la separación. Por lo que se procedió a hacer la separación cuando el material estaba un poco por debajo de su temperatura de trabajo. Es por esto que el *Ensayo 4* presenta la curva de espesor de la cara 3 con tanta variación.

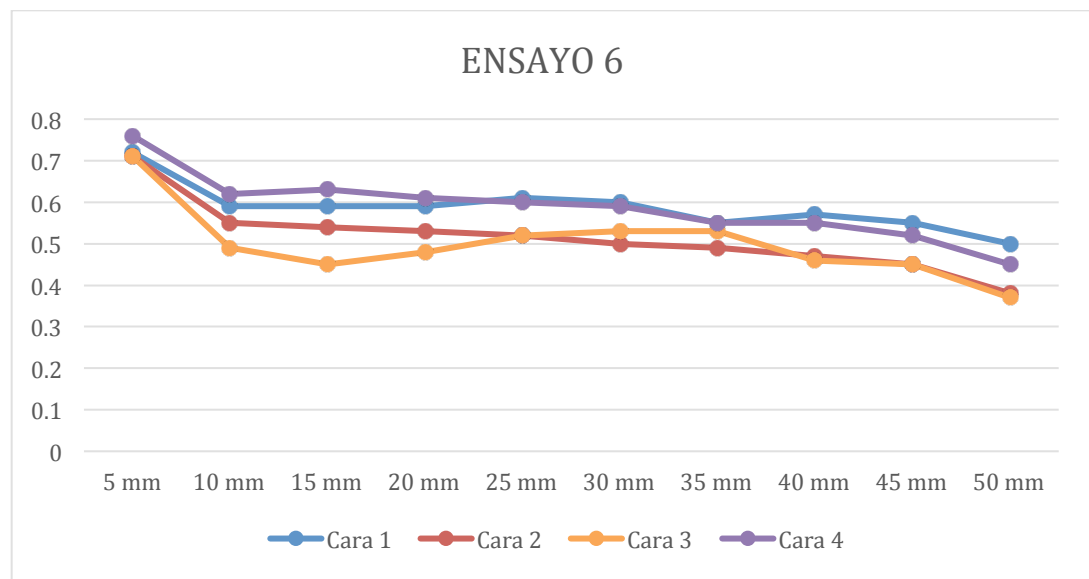
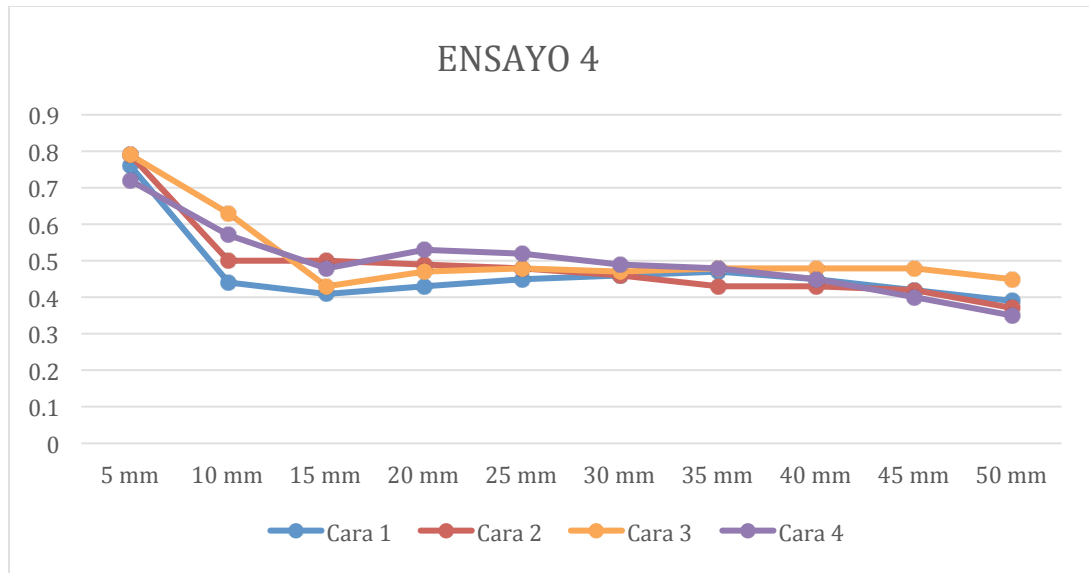
5.2.2.4.2 Conclusiones

Se determina que de los ensayos estudiados, que el *Ensayo 1* ilustrado en el capítulo de resultados es el más óptimo, por no presentar deformaciones muy destacables. Sin embargo, se puede considerar el *Ensayo 2* como óptimo también por mantener muy poca variación en los distintos puntos al comparar las cuatro caras.

Debido al grosor del material, el hecho de tener un chaflán en los vértices de la cara superior del *Ensayo 2* no hace que se cumpla con la propagación con uniformidad del material justo al principio de la pared lateral. Esta información es suficiente para determinar que existe una dependencia directa entre el grosor del material y el acabado del vértice de la cara superior del molde.

5.2.2.5 Ensayos HIPS de 1mm de grosor





5.2.2.5.1 Discusiones

Es necesario determinar el valor de los parámetros variables teniendo en cuenta que el material ahora es más fino que de costumbre.

El proveedor de la máquina calcula los tiempos de exposición de los materiales para que lleguen a su temperatura de termoconformado en función de sus grosores. Por lo que se partió de la referencia de tiempo de exposición del material más grueso y se redujo aproximadamente en igual proporción que la diferencia de grosores.

Las pruebas se realizaron con 25s de exposición y -0.6bar de presión de vacío y se obtuvieron resultados favorables.

Se observan de nuevo en todos los ensayos que se repite la deformación de la cara 3.

En la gráfica del *Ensayo 6* se puede observar la disminución repentina de espesor en los primeros 10 mm en todas las caras de la pieza final. El hecho de tener el molde sus vértices superiores acabados en pequeños radios de redondeo, los cuales son más similares a vértices afilados, apoya la teoría de ser óptimo el avance del material desde la base superior cuando el vértice está en forma de chaflán.

5.2.2.5.2 Conclusiones

En el *Ensayo 4* se desmiente en parte la teoría de que la deformación se producía por estar próximo al borde. Aunque es cierto y está comprobado que al colocar al lado de los bordes de la ventana reductora, el material se deforma más; la deformación originada a lo largo de la cara 3 se produce por otra razón que se verifica en un estudio aparte.

Con lo discutido a partir de la información del *Ensayo 6* se puede confirmar la conclusión de ser óptimo aquellos ensayos que tienen sus vértices acabados en chaflanes.

5.2.2.6 Verificación de la causa de la deformación en la cara 3

Se realizan 2 pruebas distintas, una se repite de ellas para la comprobación, con HIPS de 1.5mm de espesor para verificar que la posición en la que se encuentra el canal de vaciado es el causante de que se deforme el espesor de la cara 3. Es suficiente realizar el estudio de manera cualitativa debido a que los resultados son fácilmente destacables como se muestra en las imágenes a continuación.

Una primera prueba en la que utiliza una presión de vaciado de apenas -0.6bar es suficiente para observar la rápida disminución de grosor que se sufre en la zona del recuadro. En la imagen, la punta de la flecha indica la posición a la que se encuentra el canal de vaciado.

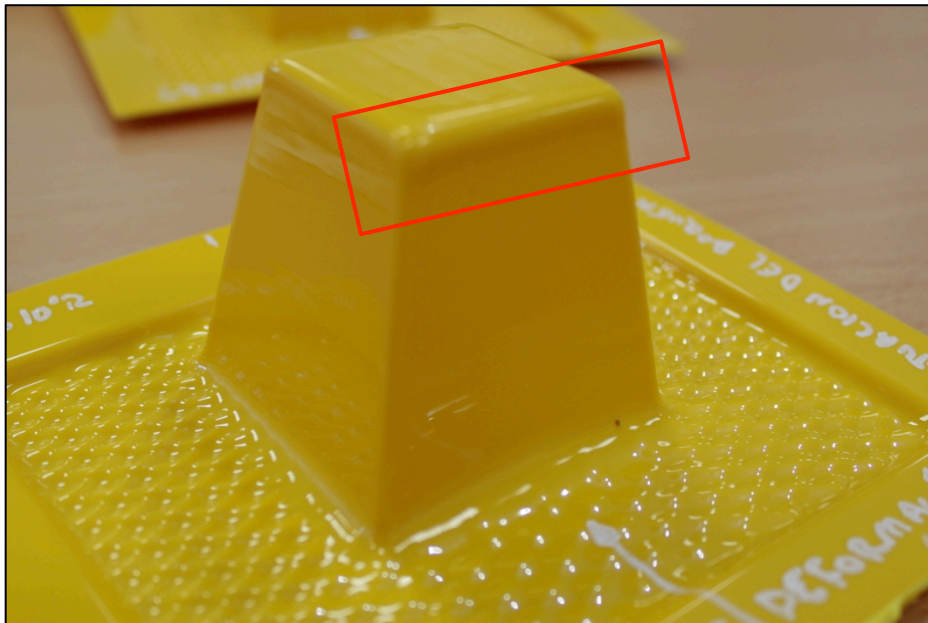


Figura 5-2

Esta primera prueba se repite aumentando la presión de vaciado hasta -0.8 bar y se observa que aparecen más defectos, precisamente arrugas.

Las arrugas aparecen por un exceso de estiramiento en el material que después no tiene área sobre la que apoyarse. El canal de vaciado influye de manera en que sobre-estira el material por el lado correspondiente a la cara 3 al ser la primera parte de la zona estanca que se vacía.



Figura 5-3

Una segunda prueba sirve de comprobación de la hipótesis. El molde se coloca de manera que deja parcialmente expuesto el canal de vaciado y lo que sucede es análogo a lo expuesto en la *Figura 5-1* pero de manera que se multiplica el estiramiento debido a la fuerza de vaciado.

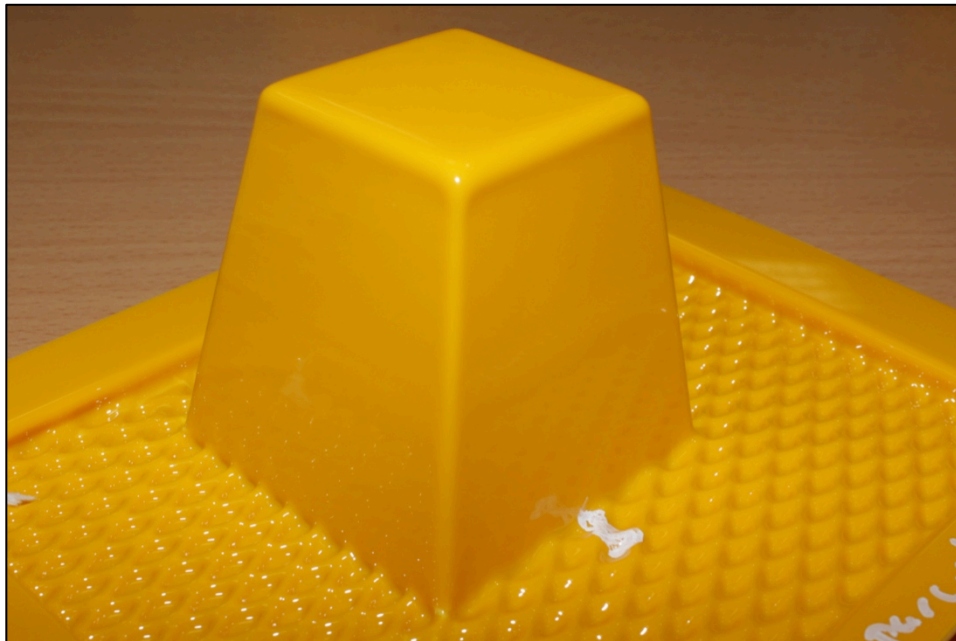


Figura 5-4

5.2.2.7 Conclusiones generales para el trabajo con moldes de ureol de gran precisión geométrica

El análisis y discusión de los resultados de todas las pruebas realizadas aportan las siguientes conclusiones generales:

- El acabado de los vértices de la base superior determinará cómo se propagará el material desde el inicio al fin del ensayo, siendo óptimo para HIPS de máximo 1.5mm de grosor un acabado en forma de chaflán de al menos $45^{\circ} \times 0.75\text{mm}$.
- Se podrá realizar un ensayo óptimo con HIPS de 1.5mm de grosor utilizando los siguientes parámetros:
 - o Un tiempo de exposición a la fuente de calor comprendido en un rango de 34 - 38 segundos.
 - o Una presión de vaciado de no más de -0.7bar .
 - o Una altura máxima del molde de 55mm.
 - o Una inclinación de las paredes respecto a un plano vertical de al menos 8° .
 - o Útil pero no imprescindible, vaselina para proporcionar una buena lubricación y mayor facilidad para conseguir el desmoldeo.
- Se podrá realizar un ensayo óptimo con HIPS de 1mm de grosor utilizando los siguientes parámetros:
 - o Un tiempo de exposición a la fuente de calor de 25 segundos.
 - o Una presión de vaciado de no más de -0.6bar .
 - o Una altura máxima del molde de 55mm.
 - o Una inclinación de las paredes respecto a un plano vertical de al menos 10° .
 - o Útil pero no imprescindible, vaselina para proporcionar una buena lubricación y mayor facilidad para conseguir el desmoldeo.
- Se determina que el PE de 3mm de grosor se descarta como material apropiado para el termoconformado con la máquina Formech Compac Mini.
- Se confirma que el material PMMA de 3mm de grosor es un material con buenas características de resistencia y dureza sin embargo, no resulta ser un material apropiado para el termoconformado a nivel doméstico.

- Se confirma que la ventana reductora de la máquina tiene un mal diseño y resulta ser el factor que causa la deformación en la gran mayoría de los ensayos por la cara 3.

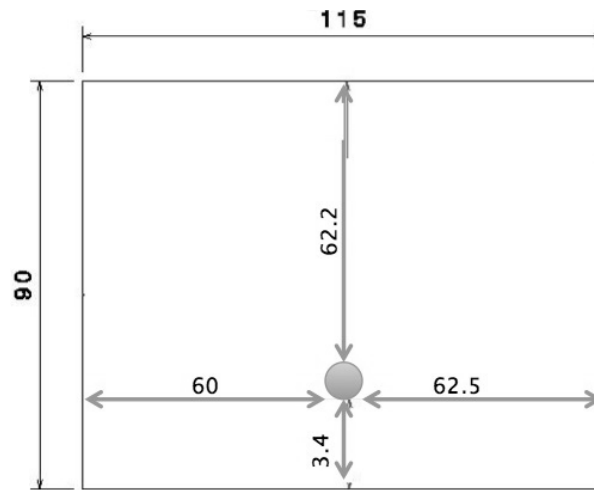


Figura 5-5

5.3 Líneas futuras

Hay infinidad de pruebas y ensayos que se pueden realizar y modificar en el proceso de termoconformado. Como posteriores investigaciones y líneas futuras se pueden dejar las siguientes:

- En este TFG se han hecho las pruebas con una serie de moldes de, generalmente poca variación de altura. Se podría investigar de manera detallada cómo influye la diferencia de altura en la reproducción de los moldes.
- En este TFG se ha estudiado el funcionamiento de la máquina acorde a una serie de moldes denominados machos, sin embargo, el proceso del termoconformado permite reproducir cavidades y huecos, resultaría de gran interés estudiar los límites de trabajo de la máquina con moldes que contienen cavidades.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Myer Kutz, *Applied Plastics Engineering Handbook*. Delmar, NY, USA: William Andrew, 2011.
- [2] Mikell P. Groover, *Fundamentos de Manufactura Moderna*, 3rd ed., McGraw-Hill, Ed., 2007.
- [3] J H DuBois, *Plastics History USA*. Boston, MA, USA: Cahners Books, 1972.
- [4] Andrew J Peacock and Allison Calhoun, *Polymer Chemistry. Properties and Applications.*, 1st ed. Richmond, VA, USA: Hanser Gardner Publications, 2006.
- [5] Karina Romero. (2011, Marzo) Tecnopolímeros. [Online]. <http://tecnopolimeros.blogspot.com.es/2011/03/tipos-de-polimeros.html>
- [6] A. Marcilla and M Beltrán, *Tecnología de Polímeros. Procesado y Propiedades*. Alicante, España: Universidad de Alicante, 2012.
- [8] Julián Rodríguez Muñoz, Lucas Castro Martínez, and Juan Carlos del Real, *Procesos industriales para materiales no metálicos*, 2nd ed. Madrid, España: Visión Net, 2006.
- [7] Jim Throne, "Thermoforming 101," *Thermoforming Quarterly*, vol. 17, no. 3, p. 23, September 1998.
- [9] James L. Throne, *Understanding Thermoforming*, 2nd ed. Dunedin, FL, USA: Hanser Gardner, 2008.
- [10] James L. Throne, *Technology of Thermoforming*. Cincinnati, OH, USA: Hanser Gardner Publications, 1996.
- [11] Formech International Limited, "Formech Vacuum Guide Instructions," Hertfordshire,.
- [12] Anon, *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. USA:

Forest Products Laboratory.

- [13] Gruenwald, *Thermoforming. A Plastics Processing Guide*, 2nd ed. Basel , Switzerland: Technomic Publishing AG, 1998.
- [14] John Wiley & Sons, *Stress Analysis of Polymers.*, 1973.
- [15] Association of Plastics Manufacturers. Plastics Europe. Consultic Eurostat.
- [16] The European House Ambrosetti. [Online]. www.ambrosetti.eu/en
- [17] R C Progelhof and Jim Throne, *Polymer Engineering. Principles: Properties, Processes, Tests for Design*. Munich: Hanser Publishers, 1993.

7 ANEXOS

7.1 Anexo I. Tablas y gráficas de los ensayos restantes.

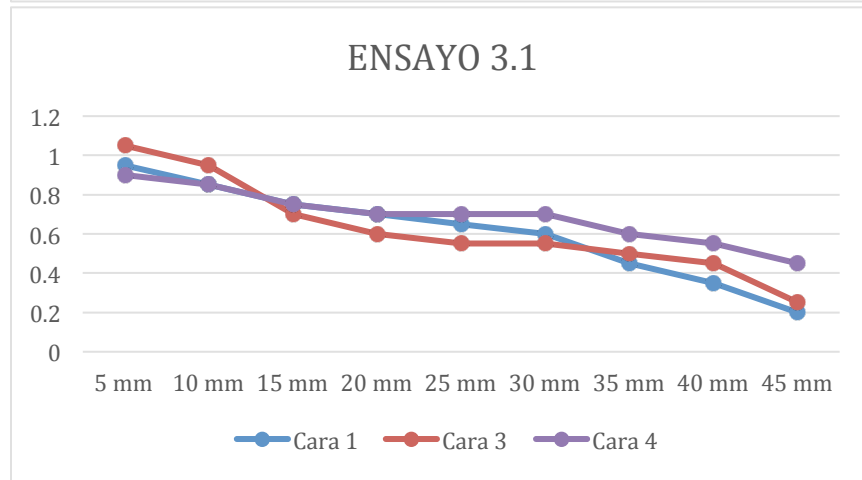
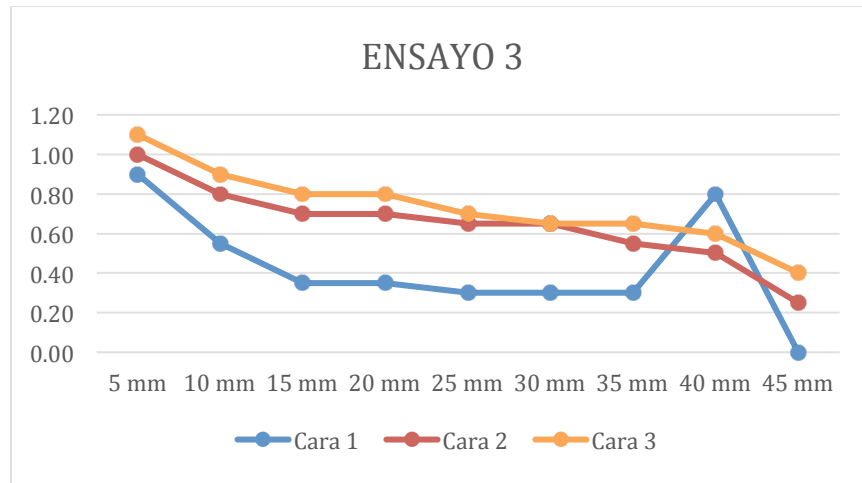
A continuación se incluyen los valores de los grosores de las caras laterales de todos los ensayos realizados que no figuran en el *CAPÍTULO IV. RESULTADOS*.

A1.1 Ensayos de pruebas con moldes de arcilla

A1.1.1 Ensayos con dos moldes

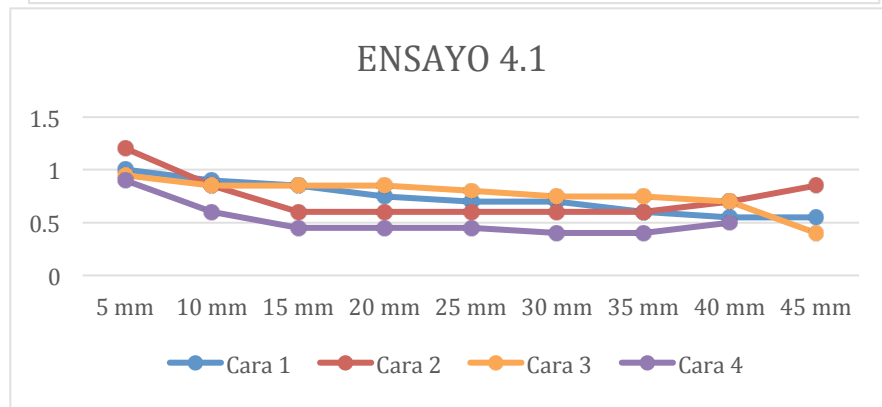
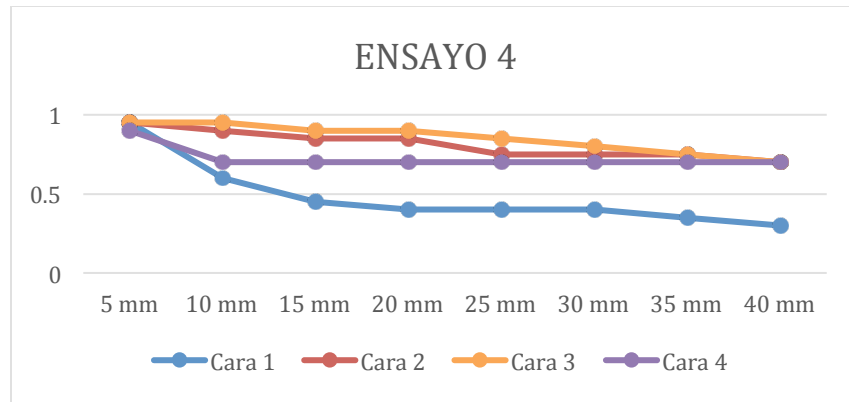
Ensayo 3

		Molde 5°				
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4	
3	5 mm	0.90	1	1.1		
	10 mm	0.55	0.8	0.9		
	15 mm	0.35	0.7	0.8		
	20 mm	0.35	0.7	0.8		
	25 mm	0.30	0.65	0.7		
	30 mm	0.30	0.65	0.65		
	35 mm	0.30	0.55	0.65		
	40 mm	0.80	0.5	0.6		
	45 mm		0.25	0.4		
			Molde 10°			
			Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
3.1	5 mm	0.95		1.05	0.9	
	10 mm	0.85		0.95	0.85	
	15 mm	0.75		0.7	0.75	
	20 mm	0.7		0.6	0.7	
	25 mm	0.65		0.55	0.7	
	30 mm	0.6		0.55	0.7	
	35 mm	0.45		0.5	0.6	
	40 mm	0.35		0.45	0.55	
	45 mm	0.2		0.25	0.45	



Ensayo 4.

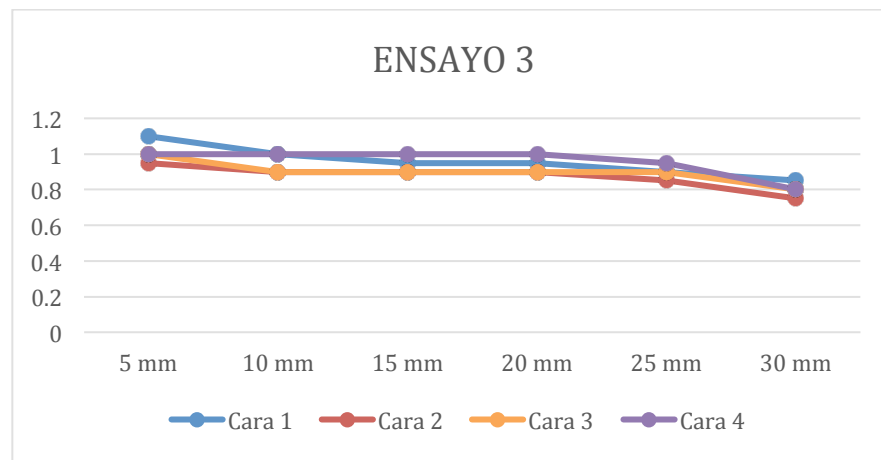
		Molde 10°				
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4	
4	5 mm	0.95	0.95	0.95	0.9	
	10 mm	0.6	0.9	0.95	0.7	
	15 mm	0.45	0.85	0.9	0.7	
	20 mm	0.4	0.85	0.9	0.7	
	25 mm	0.4	0.75	0.85	0.7	
	30 mm	0.4	0.75	0.8	0.7	
	35 mm	0.35	0.75	0.75	0.7	
	40 mm	0.3	0.7	0.7	0.7	
			Molde 15°			
			Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
4.1	5 mm	1	1.2	0.95	0.9	
	10 mm	0.9	0.85	0.85	0.6	
	15 mm	0.85	0.6	0.85	0.45	
	20 mm	0.75	0.6	0.85	0.45	
	25 mm	0.7	0.6	0.8	0.45	
	30 mm	0.7	0.6	0.75	0.4	
	35 mm	0.6	0.6	0.75	0.4	
	40 mm	0.55	0.7	0.7	0.5	
	45 mm	0.55	0.85	0.4		



A1.1.2 Ensayos con plataforma

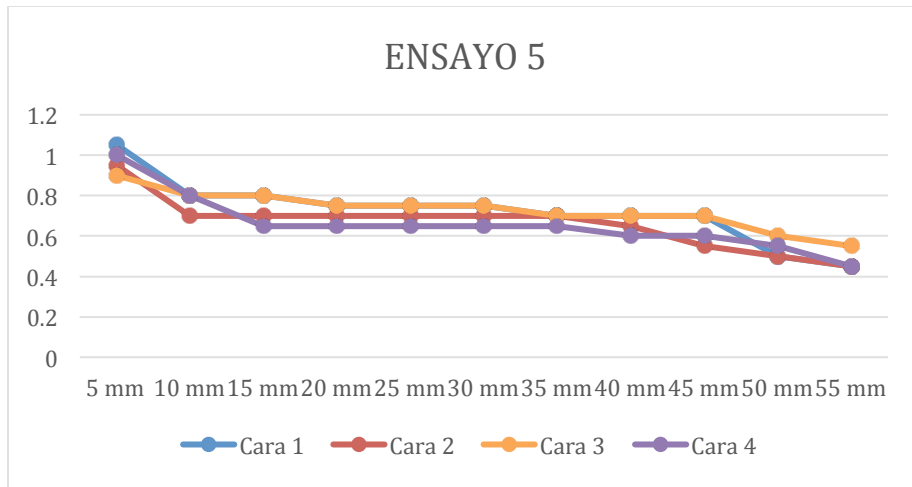
Ensayo 3.

		Molde de 10°			
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
3	5 mm	1.1	0.95	1	1
	10 mm	1	0.9	0.9	1
	15 mm	0.95	0.9	0.9	1
	20 mm	0.95	0.9	0.9	1
	25 mm	0.9	0.85	0.9	0.95
	30 mm	0.85	0.75	0.8	0.8



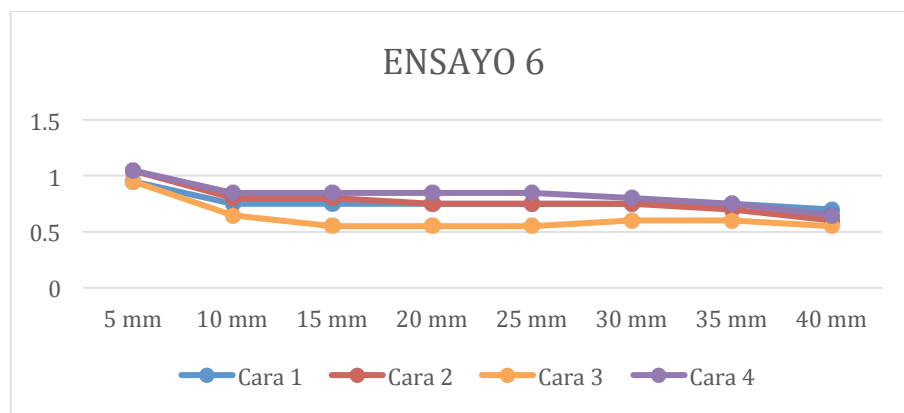
Ensayo 5

		Molde de 5°			
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
5	5 mm	1.05	0.95	0.9	1
	10 mm	0.8	0.7	0.8	0.8
	15 mm	0.8	0.7	0.8	0.65
	20 mm	0.75	0.7	0.75	0.65
	25 mm	0.75	0.7	0.75	0.65
	30 mm	0.75	0.7	0.75	0.65
	35 mm	0.7	0.7	0.7	0.65
	40 mm	0.7	0.65	0.7	0.6
	45 mm	0.7	0.55	0.7	0.6
	50 mm	0.5	0.5	0.6	0.55



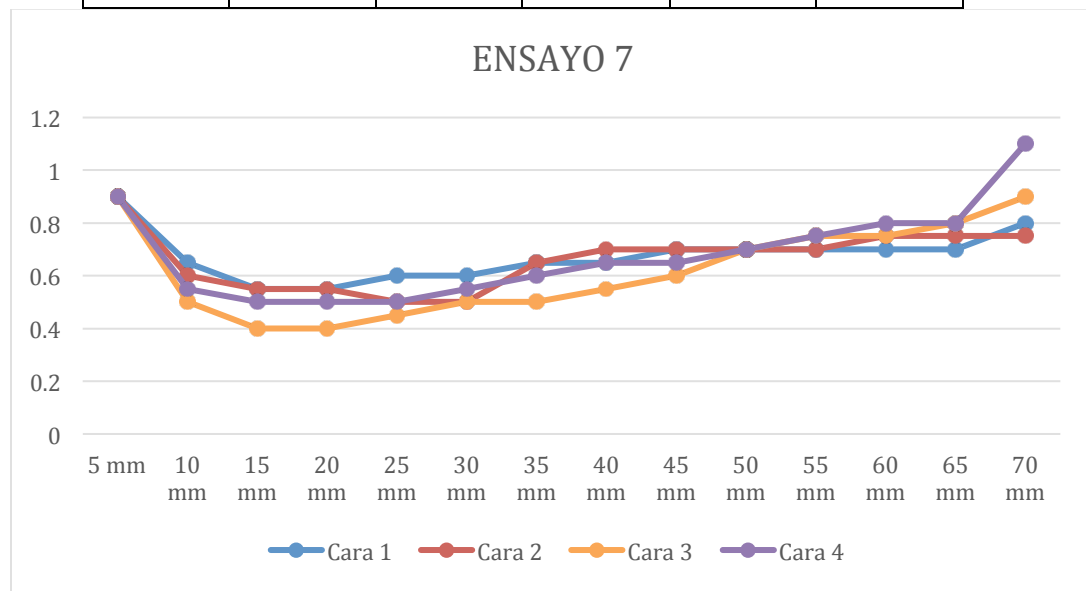
Ensayo 6

		Molde de 5°			
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
6	5 mm	0.95	1.05	0.95	1.05
	10 mm	0.75	0.8	0.65	0.85
	15 mm	0.75	0.8	0.55	0.85
	20 mm	0.75	0.75	0.55	0.85
	25 mm	0.75	0.75	0.55	0.85
	30 mm	0.75	0.75	0.6	0.8
	35 mm	0.75	0.7	0.6	0.75
	40 mm	0.7	0.6	0.55	0.65



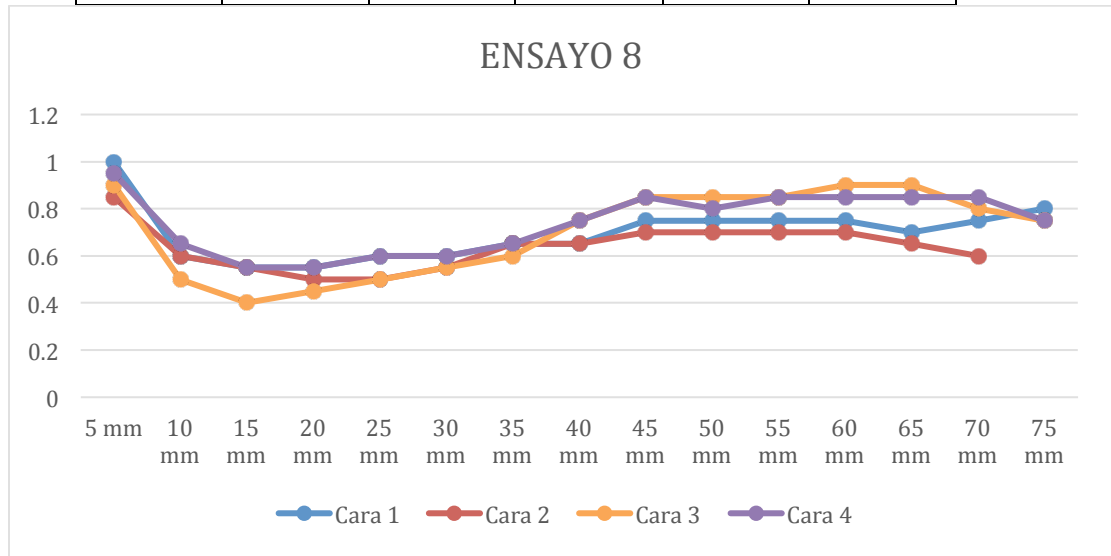
Ensayo 7

		Molde de 10°			
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
7	5 mm	0.9	0.9	0.9	0.9
	10 mm	0.65	0.6	0.5	0.55
	15 mm	0.55	0.55	0.4	0.5
	20 mm	0.55	0.55	0.4	0.5
	25 mm	0.6	0.5	0.45	0.5
	30 mm	0.6	0.5	0.5	0.55
	35 mm	0.65	0.65	0.5	0.6
	40 mm	0.65	0.7	0.55	0.65
	45 mm	0.7	0.7	0.6	0.65
	50 mm	0.7	0.7	0.7	0.7
	55 mm	0.7	0.7	0.75	0.75
	60 mm	0.7	0.75	0.75	0.8
	65 mm	0.7	0.75	0.8	0.8
	70 mm	0.8	0.75	0.9	1.1



Ensayo 8

		Molde de 10°			
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
8	5 mm	1	0.85	0.9	0.95
	10 mm	0.6	0.6	0.5	0.65
	15 mm	0.55	0.55	0.4	0.55
	20 mm	0.55	0.5	0.45	0.55
	25 mm	0.6	0.5	0.5	0.6
	30 mm	0.6	0.55	0.55	0.6
	35 mm	0.65	0.65	0.6	0.65
	40 mm	0.65	0.65	0.75	0.75
	45 mm	0.75	0.7	0.85	0.85
	50 mm	0.75	0.7	0.85	0.8
	55 mm	0.75	0.7	0.85	0.85
	60 mm	0.75	0.7	0.9	0.85
	65 mm	0.7	0.65	0.9	0.85
	70 mm	0.75	0.6	0.8	0.85
	75 mm	0.8		0.75	0.75

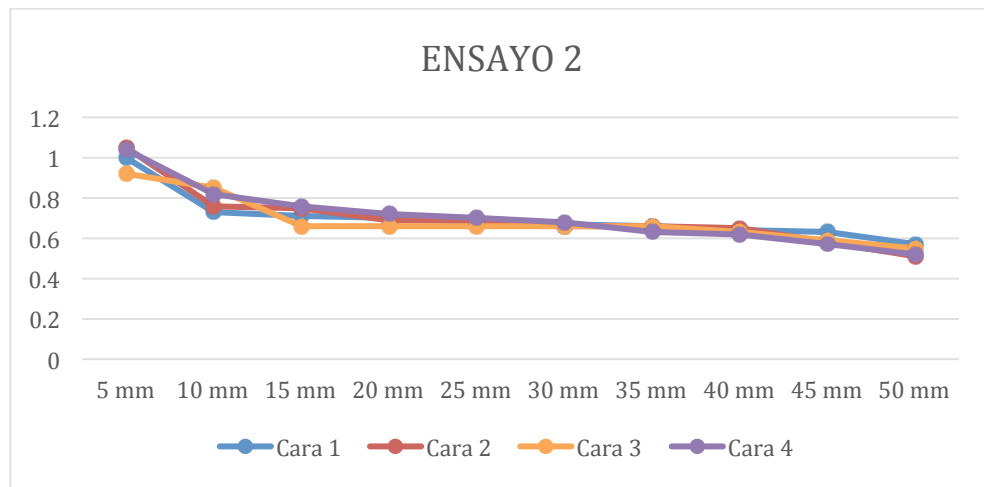


A1.2 Ensayos de pruebas con molde de ureol

A1.2.1 Moldes lubricados

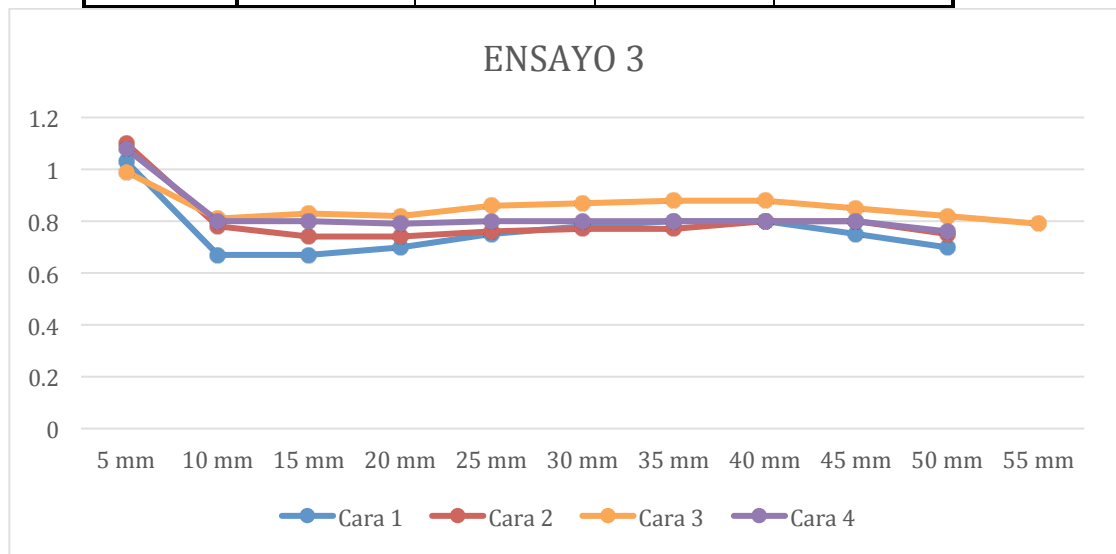
Ensayo 2

		4° Vértices acabados en chaflán 45°x0.75[mm]			
		A	B	C	D
2		26.5	35	23	35
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
		1.00	1.05	0.92	1.04
		0.73	0.76	0.85	0.82
		0.71	0.75	0.66	0.76
		0.70	0.69	0.66	0.72
		0.68	0.69	0.66	0.70
		0.67	0.66	0.66	0.68
		0.66	0.66	0.66	0.63
		0.64	0.65	0.63	0.62
		0.63	0.58	0.59	0.57
		0.57	0.51	0.55	0.52



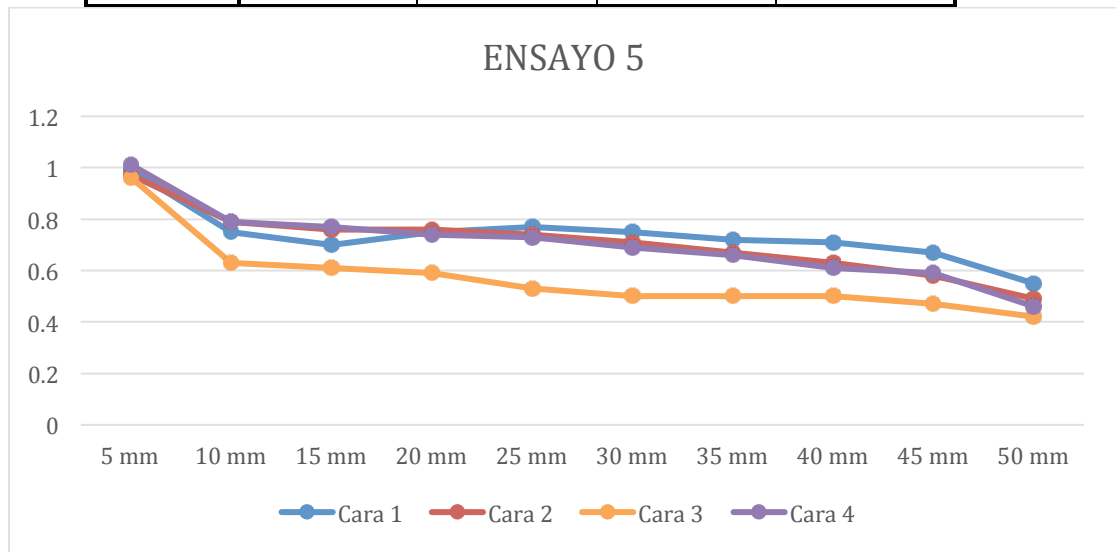
Ensayo 3

12° Vértices acabados en chaflán 45°x0.75[mm]				
	A	B	C	D
	16.5	28	27	33.5
	Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
	1.03	1.10	0.99	1.08
	0.67	0.78	0.81	0.80
	0.67	0.74	0.83	0.80
3	0.70	0.74	0.82	0.79
	0.75	0.76	0.86	0.80
	0.78	0.77	0.87	0.80
	0.80	0.77	0.88	0.80
	0.80	0.80	0.88	0.80
	0.75	0.80	0.85	0.80
	0.70	0.75	0.82	0.76
	-	-	0.79	-



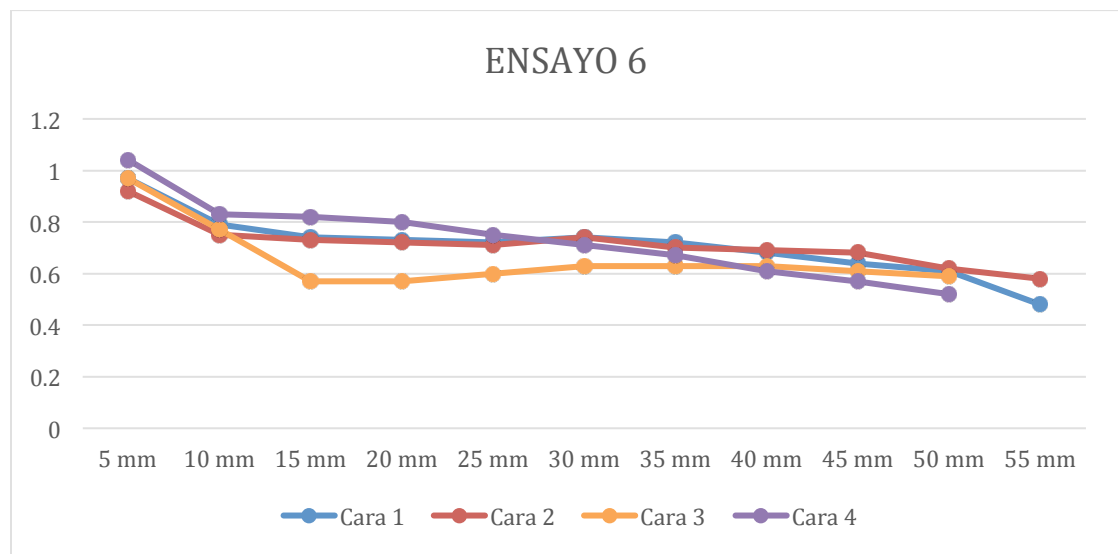
Ensayo 5

		2° Vértices Vivos y Redondos			
		A	B	C	D
5		27	30	19	33
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
		0.99	0.97	0.96	1.01
		0.75	0.79	0.63	0.79
		0.70	0.76	0.61	0.77
		0.75	0.76	0.59	0.74
		0.77	0.74	0.53	0.73
		0.75	0.71	0.50	0.69
		0.72	0.67	0.50	0.66
		0.71	0.63	0.50	0.61
		0.67	0.58	0.47	0.59
		0.55	0.49	0.42	0.46



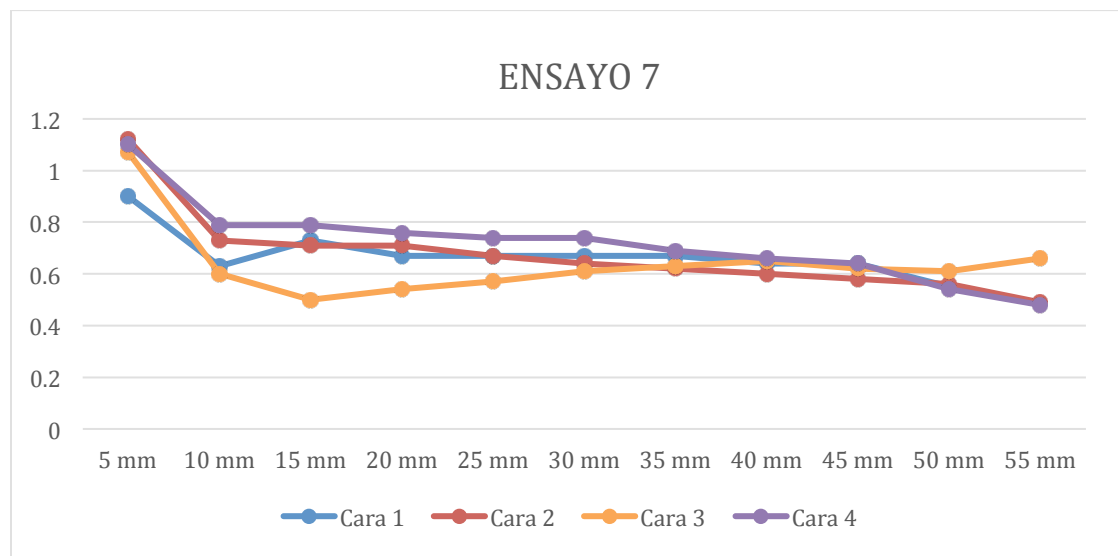
Ensayo 6

		3° Vértices Vivos			
		A	B	C	D
6		27.5	36	22.5	36
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
		0.97	0.92	0.97	1.04
		0.79	0.75	0.77	0.83
		0.74	0.73	0.57	0.82
		0.73	0.72	0.57	0.80
		0.72	0.71	0.60	0.75
		0.74	0.74	0.63	0.71
		0.72	0.70	0.63	0.67
		0.68	0.69	0.63	0.61
		0.64	0.68	0.61	0.57
		0.61	0.62	0.59	0.52
		0.48	0.58	-	-



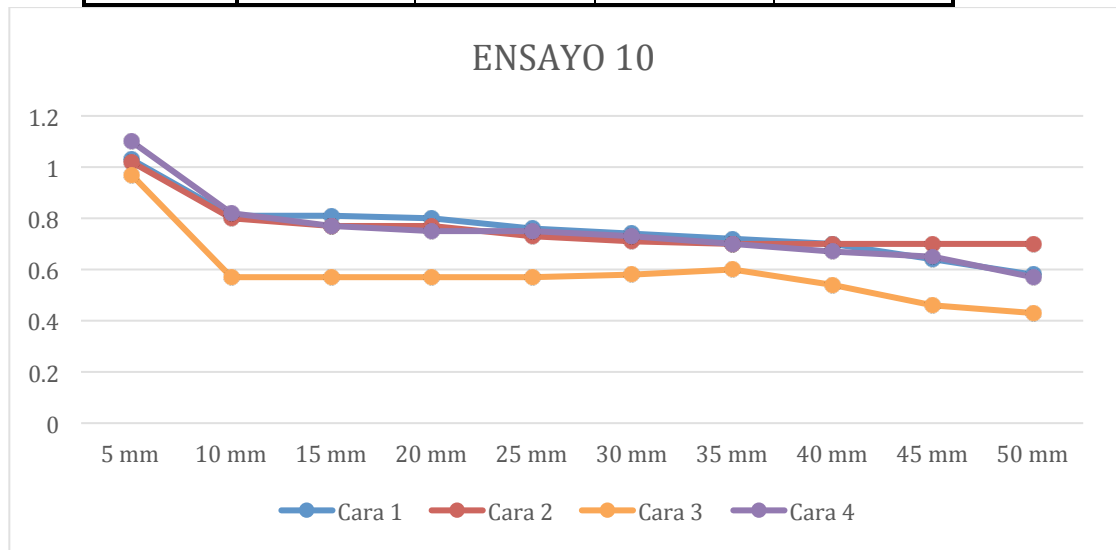
Ensayo 7

3° Vértices Vivos y Redondeados				
	A	B	C	D
	25.5	34.5	24	36
	Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
	0.90	1.12	1.07	1.10
	0.63	0.73	0.60	0.79
	0.73	0.71	0.50	0.79
7	0.67	0.71	0.54	0.76
	0.67	0.67	0.57	0.74
	0.67	0.64	0.61	0.74
	0.67	0.62	0.63	0.69
	0.64	0.60	0.65	0.66
	0.64	0.58	0.62	0.64
	0.55	0.56	0.61	0.54
	-	0.49	0.66	0.48



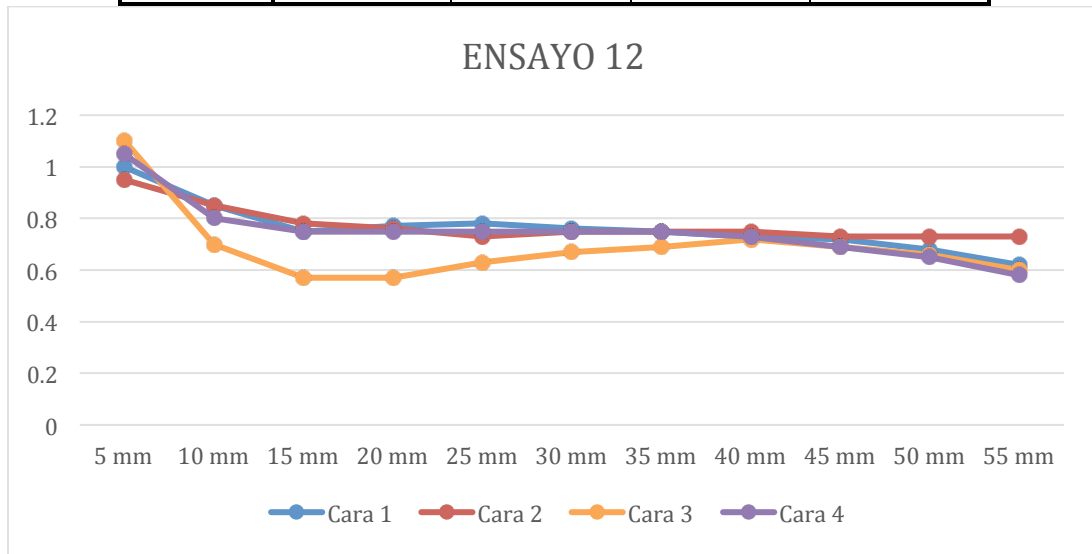
Ensayo 10

5° Vértices acabados en chaflán 45°x0.75[mm]				
	A	B	C	D
	26.5	36	19	33
	Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
10	1.03	1.02	0.97	1.10
	0.81	0.80	0.57	0.82
	0.81	0.77	0.57	0.77
	0.80	0.77	0.57	0.75
	0.76	0.73	0.57	0.75
	0.74	0.71	0.58	0.73
	0.72	0.70	0.60	0.70
	0.70	0.70	0.54	0.67
	0.64	0.70	0.46	0.65
	0.58	0.70	0.43	0.57



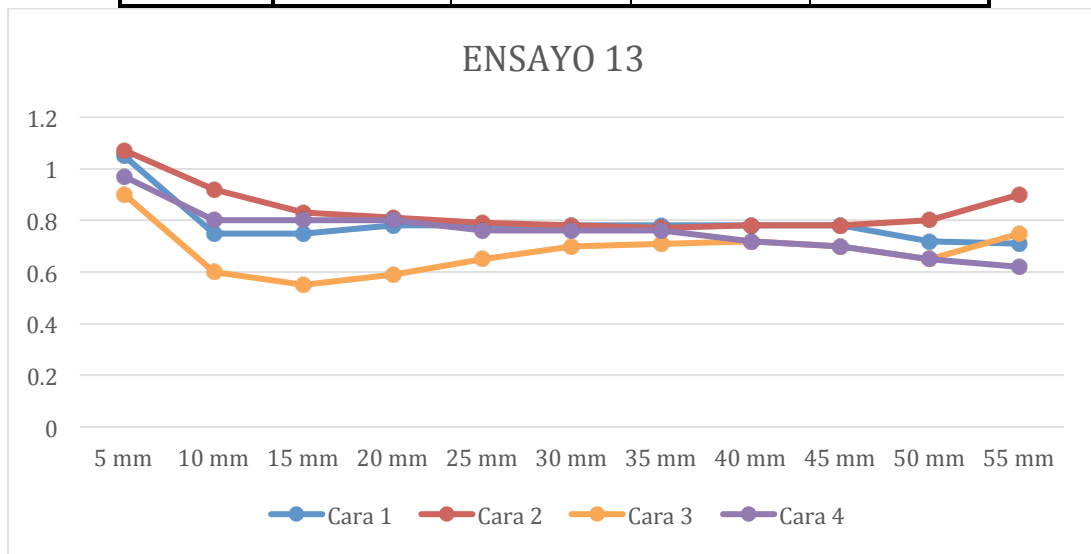
Ensayo 12

		8° Vértices acabados en chaflán 45°x0.75[mm]			
		A	B	C	D
12		27	36	19.5	32
	Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4	
	1.00	0.95	1.10	1.05	
	0.85	0.85	0.70	0.80	
	0.75	0.78	0.57	0.75	
	0.77	0.76	0.57	0.75	
	0.78	0.73	0.63	0.75	
	0.76	0.75	0.67	0.75	
	0.75	0.75	0.69	0.75	
	0.73	0.75	0.72	0.73	
	0.72	0.73	0.69	0.69	
	0.68	0.73	0.66	0.65	
	0.62	0.73	0.60	0.58	



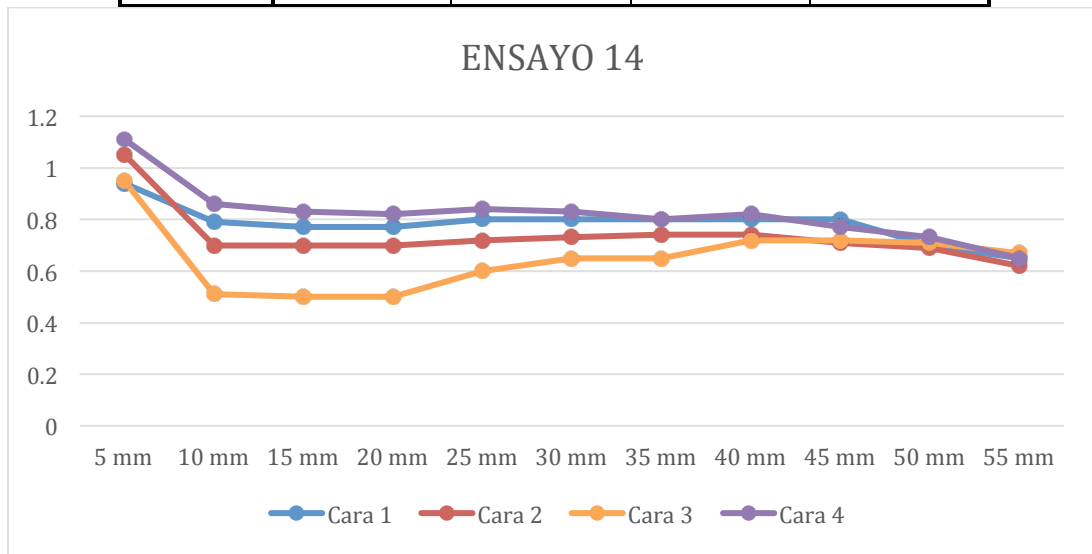
Ensayo 13

		10° Vértices vivos			
		A	B	C	D
13		25.5	37.5	21	31.5
	Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4	
	1.05	1.07	0.90	0.97	
	0.75	0.92	0.60	0.80	
	0.75	0.83	0.55	0.80	
	0.78	0.81	0.59	0.80	
	0.78	0.79	0.65	0.76	
	0.78	0.78	0.70	0.76	
	0.78	0.77	0.71	0.76	
	0.78	0.78	0.72	0.72	
	0.78	0.78	0.70	0.70	
	0.72	0.80	0.65	0.65	
	0.71	0.90	0.75	0.62	



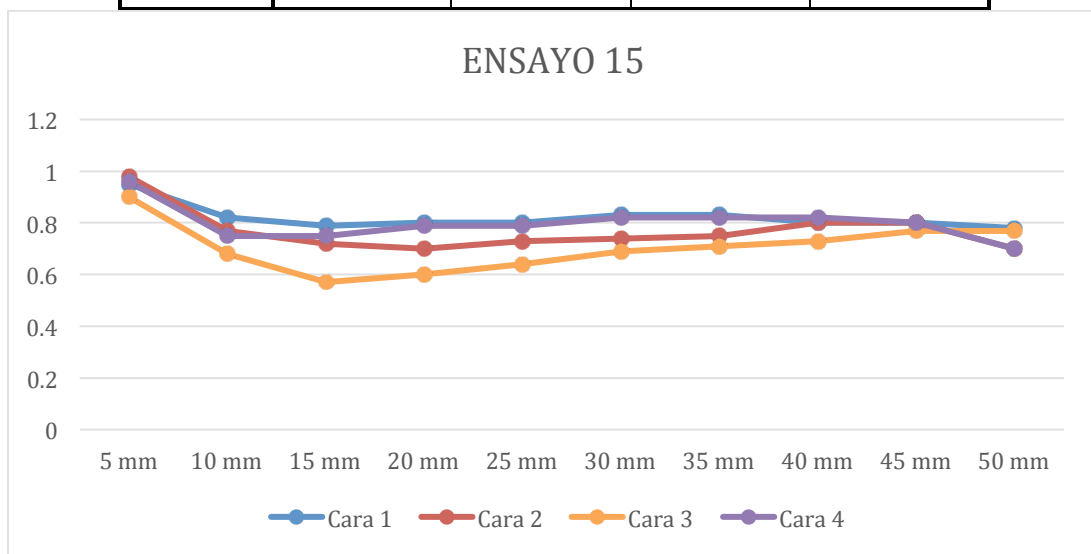
Ensayo 14

10° Vértices 1 y 3 acabados en chaflán 45°x0.75[mm]. Vértices 2 y 4 acabados en R=0.75[mm]				
	A	B	C	D
	25.5	33	20.5	36
	Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
	0.94	1.05	0.95	1.11
	0.79	0.70	0.51	0.86
14	0.77	0.70	0.50	0.83
	0.77	0.70	0.50	0.82
	0.80	0.72	0.60	0.84
	0.80	0.73	0.65	0.83
	0.80	0.74	0.65	0.80
	0.80	0.74	0.72	0.82
	0.80	0.71	0.72	0.77
	0.70	0.69	0.71	0.73
	0.65	0.62	0.67	0.65



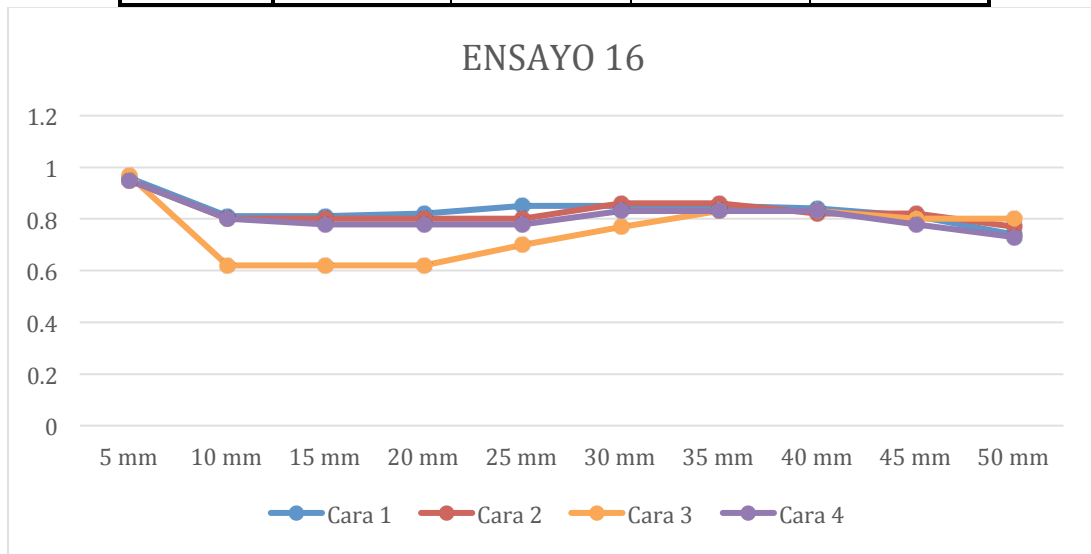
Ensayo 15

		12° Vértices ligeramente desbastados			
		A	B	C	D
15		23.5	35.5	24	35
	Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4	
	0.95	0.98	0.90	0.96	
	0.82	0.77	0.68	0.75	
	0.79	0.72	0.57	0.75	
	0.80	0.70	0.60	0.79	
	0.80	0.73	0.64	0.79	
	0.83	0.74	0.69	0.82	
	0.83	0.75	0.71	0.82	
	0.80	0.80	0.73	0.82	
	0.80	0.80	0.77	0.80	
	0.78	0.70	0.77	0.70	



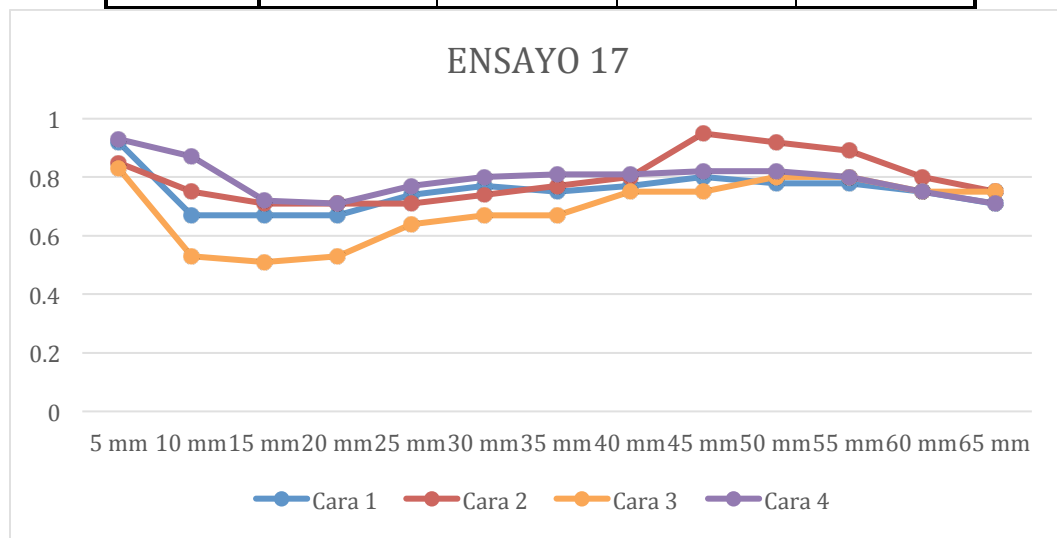
Ensayo 16

15° Vértices 1 y 3 acabados en chaflán 45°x0.75[mm]. Vértices 2 y 4 acabados en R=0.75[mm]					
		A	B	C	D
		25.5	38	21.5	31
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
16		0.96	0.95	0.97	0.95
		0.81	0.80	0.62	0.80
		0.81	0.80	0.62	0.78
		0.82	0.80	0.62	0.78
		0.85	0.80	0.70	0.78
		0.85	0.86	0.77	0.83
		0.85	0.86	0.83	0.83
		0.84	0.82	0.83	0.83
		0.81	0.82	0.80	0.78
		0.74	0.77	0.80	0.73



Ensayo 17

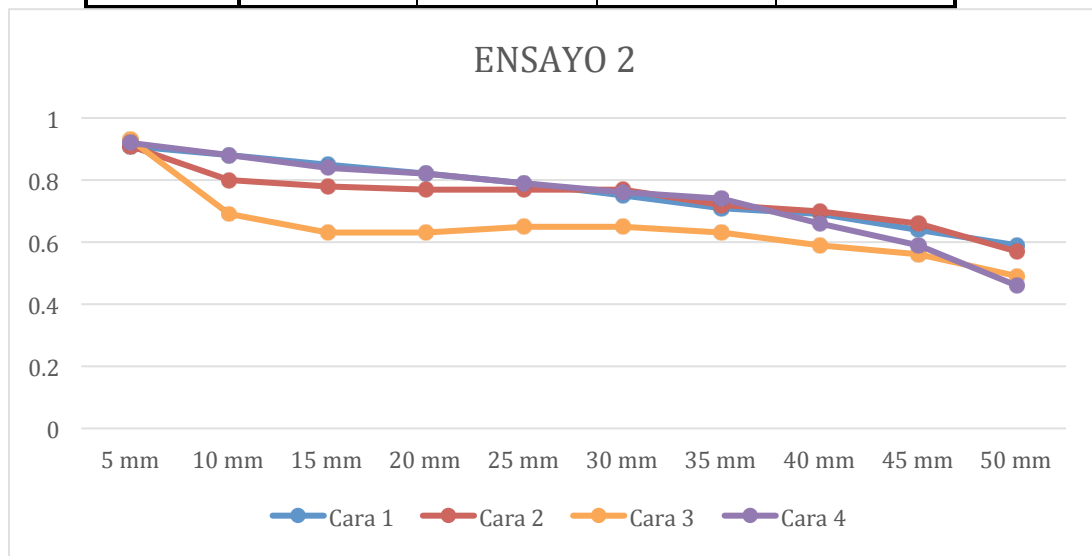
		12° [Alto] Vértices vivos			
		A	B	C	D
17		24	35.5	22	35
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
		0.92	0.85	0.83	0.93
		0.67	0.75	0.53	0.87
		0.67	0.71	0.51	0.72
		0.67	0.71	0.53	0.71
		0.74	0.71	0.64	0.77
		0.77	0.74	0.67	0.80
		0.75	0.77	0.67	0.81
		0.77	0.80	0.75	0.81
		0.80	0.95	0.75	0.82
		0.78	0.92	0.80	0.82
		0.78	0.89	0.80	0.80
		0.75	0.80	0.75	0.75
		0.71	0.75	0.75	0.71



A1.2.2 Moldes secos

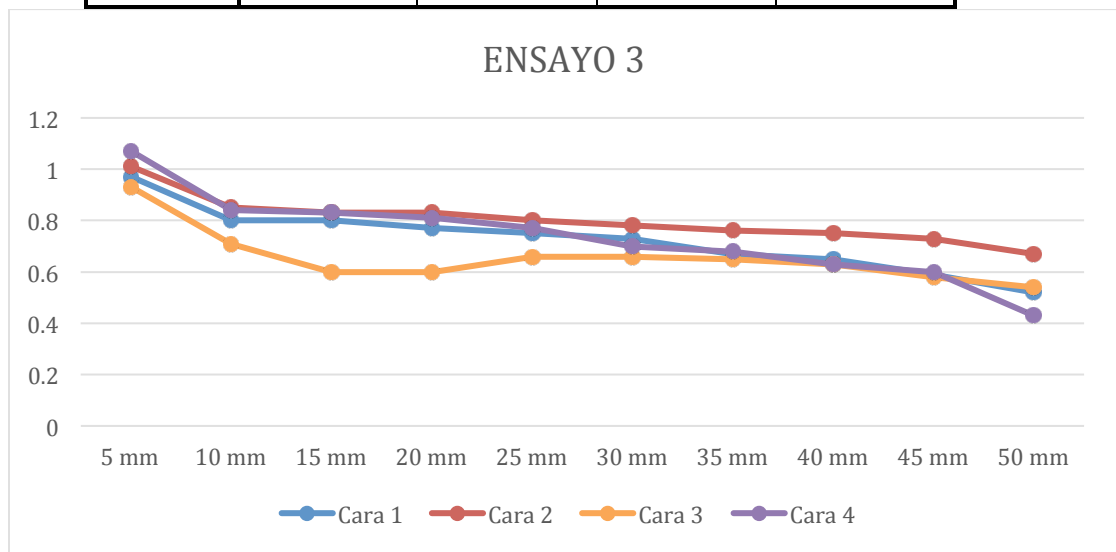
Ensayo 2

		4° Vértices acabados en chaflán 45°x0.75[mm]			
		A	B	C	D
2		26	36	19	33
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
		0.91	0.91	0.93	0.92
		0.88	0.80	0.69	0.88
		0.85	0.78	0.63	0.84
		0.82	0.77	0.63	0.82
		0.79	0.77	0.65	0.79
		0.75	0.77	0.65	0.76
		0.71	0.72	0.63	0.74
		0.69	0.70	0.59	0.66
		0.64	0.66	0.56	0.59
		0.59	0.57	0.49	0.46



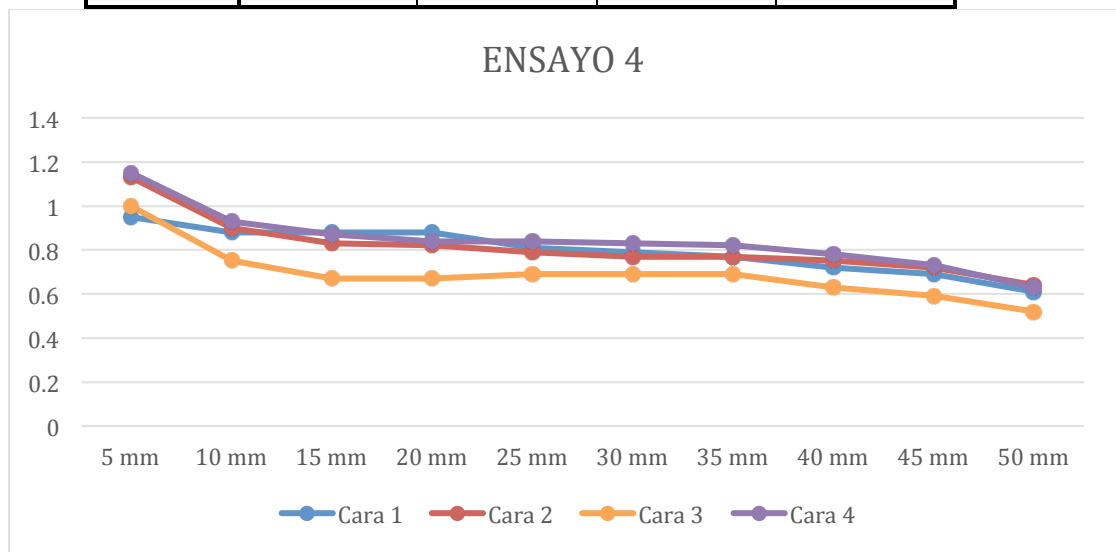
Ensayo 3

5° Vértices acabados en chaflán 45°x0.75[mm]				
	A	B	C	D
	24.5	38	21	32
	Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
	0.97	1.01	0.93	1.07
	0.80	0.85	0.71	0.84
3	0.80	0.83	0.60	0.83
	0.77	0.83	0.60	0.81
	0.75	0.80	0.66	0.77
	0.73	0.78	0.66	0.70
	0.67	0.76	0.65	0.68
	0.65	0.75	0.63	0.63
	0.59	0.73	0.58	0.60
	0.52	0.67	0.54	0.43



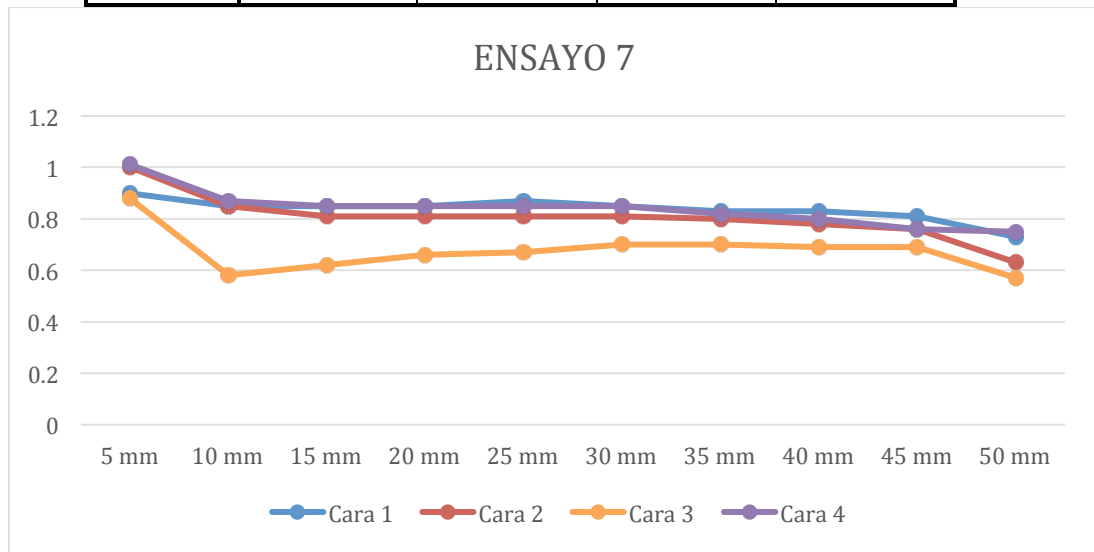
Ensayo 4

8° Vértices acabados en chaflán 45°x0.75[mm]				
	A	B	C	D
	26	35	20	36
	Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
4	0.95	1.13	1.00	1.15
	0.88	0.90	0.75	0.93
	0.88	0.83	0.67	0.87
	0.88	0.82	0.67	0.84
	0.81	0.79	0.69	0.84
	0.79	0.77	0.69	0.83
	0.77	0.77	0.69	0.82
	0.72	0.75	0.63	0.78
	0.69	0.72	0.59	0.73
	0.61	0.64	0.52	0.63



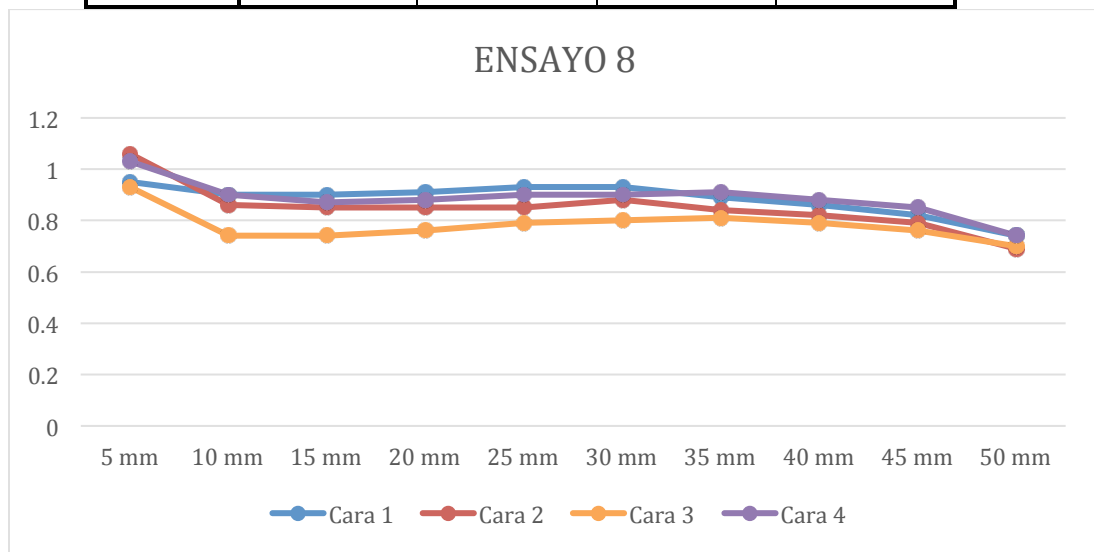
Ensayo 7

		10° Vértices vivos			
		A	B	C	D
7		28	36.5	19	33
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
		0.90	1.00	0.88	1.01
		0.85	0.85	0.58	0.87
		0.85	0.81	0.62	0.85
		0.85	0.81	0.66	0.85
		0.87	0.81	0.67	0.85
		0.85	0.81	0.70	0.85
		0.83	0.80	0.70	0.82
		0.83	0.78	0.69	0.80
		0.81	0.76	0.69	0.76
		0.73	0.63	0.57	0.75



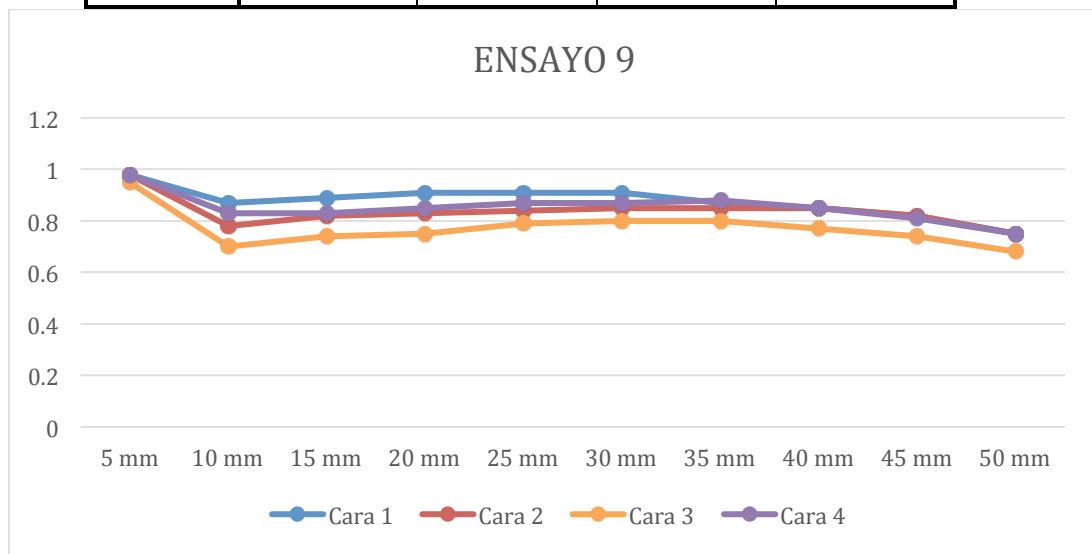
Ensayo 8

12° Vértices acabados en R=0.75[mm]				
	A	B	C	D
	25.5	34.5	23	34.5
	Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
	0.95	1.06	0.93	1.03
	0.90	0.86	0.74	0.90
8	0.90	0.85	0.74	0.87
	0.91	0.85	0.76	0.88
	0.93	0.85	0.79	0.90
	0.93	0.88	0.80	0.90
	0.89	0.84	0.81	0.91
	0.86	0.82	0.79	0.88
	0.82	0.79	0.76	0.85
	0.74	0.69	0.70	0.74



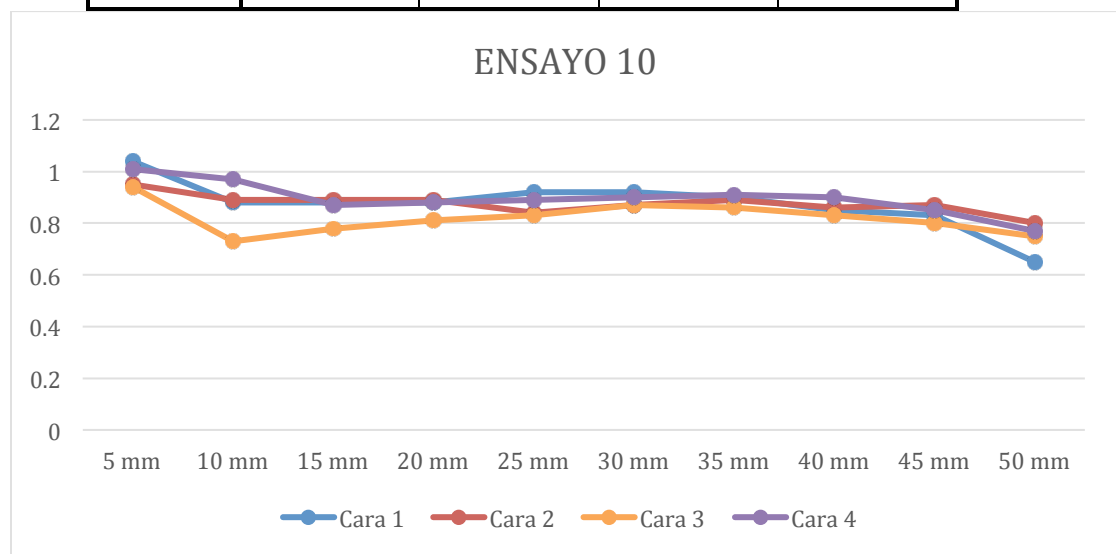
Ensayo9

12° Vértices acabados en chaflán 45°x0.75[mm]				
	A	B	C	D
	28	35	19	35.5
	Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
9	0.98	0.98	0.95	0.98
	0.87	0.78	0.70	0.83
	0.89	0.82	0.74	0.83
	0.91	0.83	0.75	0.85
	0.91	0.84	0.79	0.87
	0.91	0.85	0.80	0.87
	0.87	0.85	0.80	0.88
	0.85	0.85	0.77	0.85
	0.82	0.82	0.74	0.81
	0.75	0.75	0.68	0.75



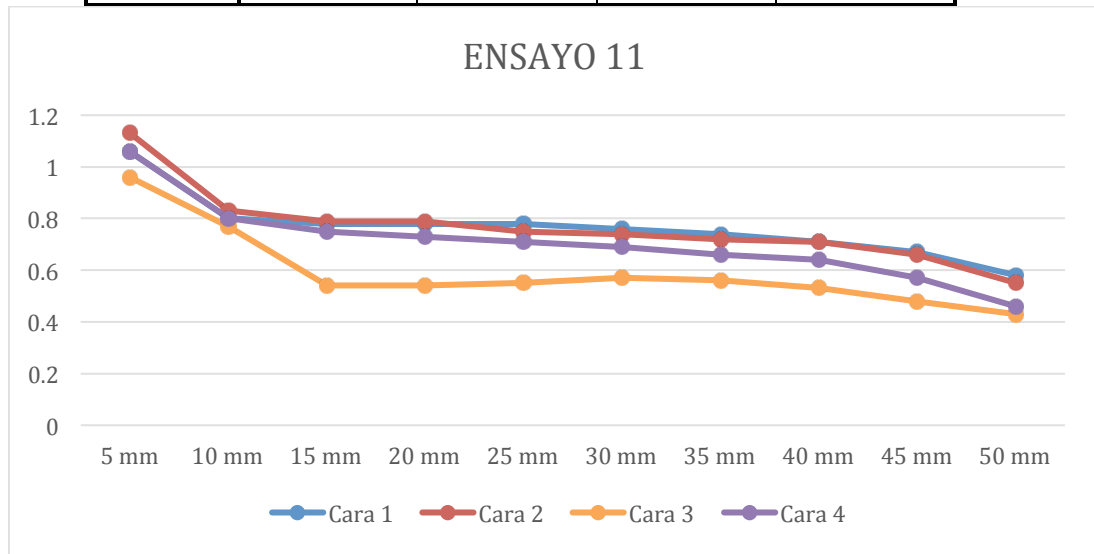
Ensayo 10

15° Vértices acabados en chaflán 45°x0.75[mm]				
	A	B	C	D
	26.5	36.5	20.5	33
	Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
10	1.04	0.95	0.94	1.01
	0.88	0.89	0.73	0.97
	0.88	0.89	0.78	0.87
	0.88	0.89	0.81	0.88
	0.92	0.84	0.83	0.89
	0.92	0.87	0.87	0.90
	0.90	0.89	0.86	0.91
	0.85	0.86	0.83	0.90
	0.83	0.87	0.80	0.85
	0.65	0.80	0.75	0.77



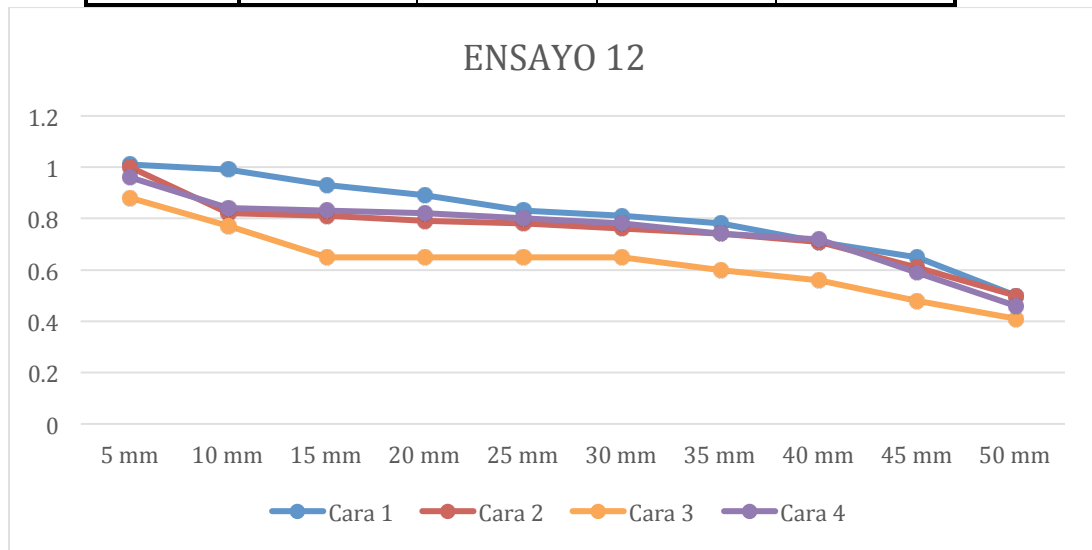
Ensayo 11

2° Vértices superiores acabados en R=0.75[mm]. Vértices laterales ligeramente desbastados.				
	A	B	C	D
	27.5	35.5	19.5	32
	Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
	1.06	1.13	0.96	1.06
	0.80	0.83	0.77	0.80
11	0.78	0.79	0.54	0.75
	0.78	0.79	0.54	0.73
	0.78	0.75	0.55	0.71
	0.76	0.74	0.57	0.69
	0.74	0.72	0.56	0.66
	0.71	0.71	0.53	0.64
	0.67	0.66	0.48	0.57
	0.58	0.55	0.43	0.46



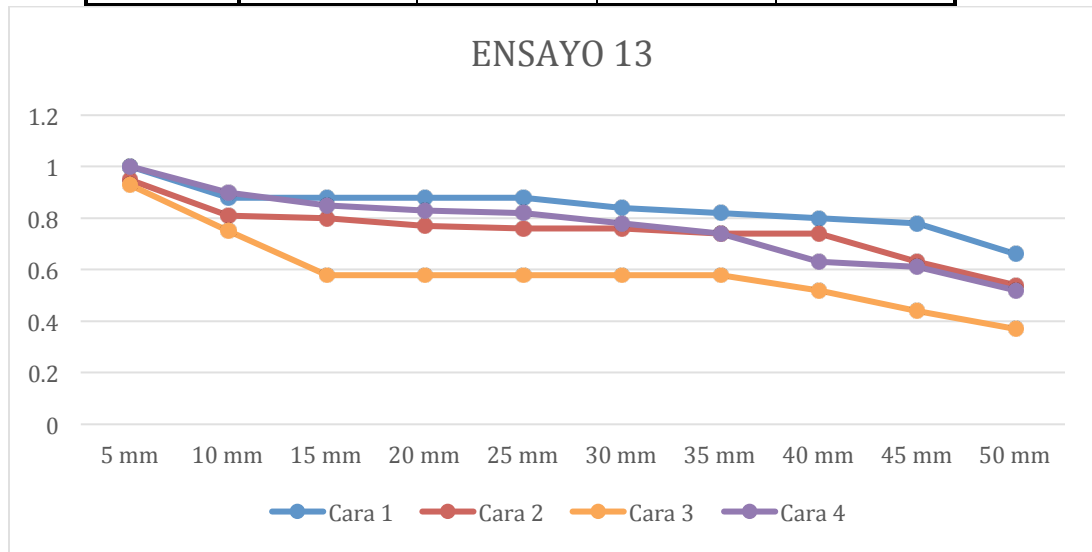
Ensayo 12

2° Todos los vértices ligeramente desbastados				
	A	B	C	D
	27	34.5	18	33.5
	Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
12	1.01	1.00	0.88	0.96
	0.99	0.82	0.77	0.84
	0.93	0.81	0.65	0.83
	0.89	0.79	0.65	0.82
	0.83	0.78	0.65	0.80
	0.81	0.76	0.65	0.78
	0.78	0.74	0.60	0.74
	0.71	0.71	0.56	0.72
	0.65	0.61	0.48	0.59
	0.50	0.50	0.41	0.46



Ensayo 13

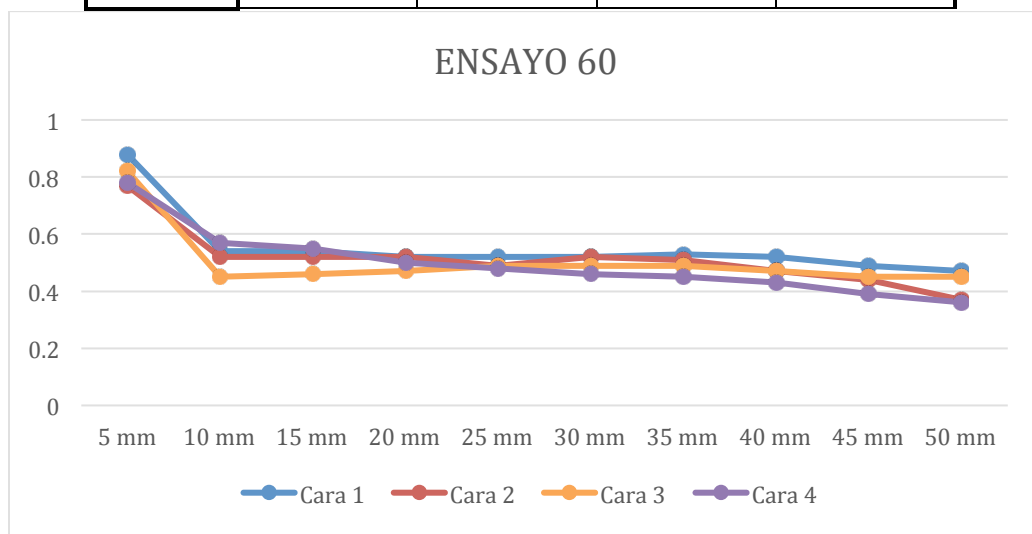
3° Vértices superiores acabados en R=0.75[mm]. Vértices laterales ligeramente desbastados.				
	A	B	C	D
	30	34	16.5	34
	Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
	1.00	0.95	0.93	1.00
	0.88	0.81	0.75	0.90
13	0.88	0.80	0.58	0.85
	0.88	0.77	0.58	0.83
	0.88	0.76	0.58	0.82
	0.84	0.76	0.58	0.78
	0.82	0.74	0.58	0.74
	0.80	0.74	0.52	0.63
	0.78	0.63	0.44	0.61
	0.66	0.54	0.37	0.52



A1.2.3 Ensayos con HIPS 1mm

Ensayo 2

		4° Con vértices superiores acabados en chaflanes 45°x0.75[mm]			
		A	B	C	D
60		23.3	38	25	33.7
		Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
		0,88	0,77	0,82	0,78
		0,54	0,52	0,45	0,57
		0,54	0,52	0,46	0,55
		0,52	0,52	0,47	0,50
		0,52	0,49	0,49	0,48
		0,52	0,52	0,49	0,46
		0,53	0,51	0,49	0,45
		0,52	0,47	0,47	0,43
		0,49	0,44	0,45	0,39
		0,47	0,37	0,45	0,36



Ensayo 5

8° con vértices superiores acabados en chaflanes 45°x0.75[mm]				
	A	B	C	D
	34.6	39.2	13.6	32.8
	Cara 1	Cara 2	Cara 3	Cara 4
	0,75	0,71	0,67	0,70
	0,65	0,56	0,48	0,63
63	0,63	0,55	0,38	0,61
	0,62	0,53	0,44	0,60
	0,61	0,53	0,46	0,57
	0,61	0,53	0,49	0,54
	0,59	0,52	0,50	0,50
	0,59	0,52	0,48	0,44
	0,58	0,49	0,43	0,39
	0,55	0,42	0,25	0,29

