



Vigilada Mineducación

Predicción experimental de la distribución de espesores para partes
termoformadas

ESTEBAN OSPINA SOTO

Trabajo de grado

Asesor

Carlos Mario Echeverri Cartagena

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN
2022

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	9
OBJETIVOS.....	11
GENERAL	11
ESPECÍFICOS	11
JUSTIFICACIÓN.....	12
USUARIOS FINALES Y ROLES	12
Áreas I+D+i.....	12
Áreas procesos, producción y calidad	12
MARCO TEÓRICO	13
Proceso de Termoformado.....	13
DESARROLLO de producto, moldes y máquina para experimentación	16
Moldes de termoformado.....	16
Diseño del producto termoformado	16
Parámetros usados para el diseño	17
Escalamiento del producto termoformado	19
Análisis teórico de predicción de espesores en modelos a escala.....	21
Selección e información de los materiales a termoformar	21
Calentamiento lámina	21
Enfriamiento del producto	24
Cálculo espesores	24
Diseño de máquina a escala prototipo funcional y diseño de detalle	26
Concepto	26

Diseño de detalle – Termoformadora prototipo a escala	28
Fabricación máquina a escala prototipo	29
Diseño molde	31
Moldes fabricados.....	33
Diseño máquina para laboratorio (diseño de detalle)	35
RESULTADOS.....	40
Experimentación a escala	40
Setup de termoformadora a escala y molde	40
Puesta a punto del proceso	42
Resultados termoformado parte original	43
Resultados termoformado parte escalada	45
Termografías y medición de temperaturas	47
Posibles consecuencias y soluciones mediciones térmicas	49
Mediciones espesores	50
Mediciones espesores producto termoformado original	51
Mediciones espesores producto termoformado escalado.....	55
Revisión datos obtenidos.....	59
Distribución promedio de espesores.....	60
NIVEL DE MADUREZ TECNOLÓGICA.....	62
Nivel 1: Investigación básica	62
Nivel 2: Concepto tecnológico	62
Nivel 3: prueba de concepto.....	63
Nivel 4: desarrollo y validación a nivel de laboratorio	63

CONSIDERACIONES ADICIONALES DESARROLLO DEL EQUIPO (8D, 9D Y 10D BIM)66

CONCLUSIONES67

REFERENCIAS70

ANEXOS72

 Termografías.....72

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 Termoformado por vacío en molde de Núcleo y Cavidad.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2 Termoformado por pre-soplado y vacío en molde de Núcleo y Cavidad.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3 Termoformado por compresión, pre-soplado y vacío en molde de Núcleo y Cavidad</i>	<i>15</i>
<i>Figura 4 Molde Positivo y Negativo (Peter Schwarzmann, 2001)</i>	<i>17</i>
<i>Figura 5 Pieza a termoformar</i>	<i>18</i>
<i>Figura 6 Pieza termoformada con sujeción</i>	<i>18</i>
<i>Figura 7 Pieza termoformada sección transversal</i>	<i>18</i>
<i>Figura 8 Producto termoformado original y escalado.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 9 Plano producto termoformado</i>	<i>20</i>
<i>Figura 10 Plano producto termoformado escalado al 50%.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 11 Concepto inicial termoformadora</i>	<i>26</i>
<i>Figura 12 Concepto final termoformadora de escritorio.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 13 Diseño detalle prototipo funcional.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 14 Sección transversal prototipo funcional.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 15 Caja madera vista frontal.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 16 Caja madera desarmada</i>	<i>29</i>
<i>Figura 17 Caja madera / Molde / Marco sujeción.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 18 Marco sujeción</i>	<i>30</i>
<i>Figura 19 Sección transversal molde.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 20 Molde y lámina.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 21 Distribución vacíos en el molde</i>	<i>32</i>
<i>Figura 22 Moldes partes original y escalada.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 23 Molde original - detalle vacíos</i>	<i>34</i>
<i>Figura 24 Molde escalado - detalle vacíos</i>	<i>34</i>
<i>Figura 25 Diseño de detalle termoformadora de escritorio</i>	<i>35</i>
<i>Figura 26 Frontal - Lateral Termoformadora de escritorio</i>	<i>35</i>
<i>Figura 27 Conjunto funcional termoformadora de escritorio</i>	<i>36</i>
<i>Figura 28 Clamp lámina termoformadora de escritorio.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 29 Detalle clamps de sujeción de lámina</i>	<i>37</i>
<i>Figura 30 Conjunto funcional clamp de lámina.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 31 Conjunto funcional vacío para molde.....</i>	<i>38</i>

<i>Figura 32 Carcasa termoformada</i>	<i>38</i>
<i>Figura 33 Vista explosión máquina termoformadora de escritorio.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 34 Prototipo funcional.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 35 Setup termoformadora vista superior</i>	<i>41</i>
<i>Figura 36 Setup termoformadora vista frontal</i>	<i>41</i>
<i>Figura 37 Partes puesta a punto molde original</i>	<i>42</i>
<i>Figura 38 Partes puesta a punto molde escalado</i>	<i>42</i>
<i>Figura 39 Parte original termoformada frontal</i>	<i>43</i>
<i>Figura 40 Parte original termoformada cortada</i>	<i>43</i>
<i>Figura 41 Parte original termoformada sección transversal.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 42 Parte original termoformada distorsión.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 43 Parte escalada termoformada superior</i>	<i>45</i>
<i>Figura 44 Parte escalada termoformada distorsión.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 45 Parte escalada termoformada distorsión cuadros más pequeños</i>	<i>46</i>
<i>Figura 46 Parte escalada termoformada frontal</i>	<i>46</i>
<i>Figura 47 Termografía lámina en horno</i>	<i>47</i>
<i>Figura 48 Termografía lámina en molde.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 49 Puntos de medición de espesores.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 50 Corte de muestras para medición de espesores.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 51 Medición producto original</i>	<i>51</i>
<i>Figura 52 Carta control medida 1 producto original</i>	<i>52</i>
<i>Figura 53 Carta control medida 2,6,10,14 producto original</i>	<i>52</i>
<i>Figura 54 Carta control medida 3,7,11,15 producto original</i>	<i>53</i>
<i>Figura 55 Carta control medida 4,8,12,16 producto original</i>	<i>53</i>
<i>Figura 56 Carta control medida 5,9,13,17 producto original</i>	<i>54</i>
<i>Figura 57 Medición producto escalado</i>	<i>55</i>
<i>Figura 58 Carta control medida 1 producto escalado</i>	<i>56</i>
<i>Figura 59 Carta control medida 2,6,10,14 producto escalado</i>	<i>56</i>
<i>Figura 60 Carta control medida 3,7,11,15 producto escalado</i>	<i>57</i>
<i>Figura 61 Carta control medida 4,8,12,16 producto escalado</i>	<i>57</i>
<i>Figura 62 Carta control medida 5,9,13,17 producto escalado</i>	<i>58</i>
<i>Figura 63 Comparativo medidas producto original y escalado</i>	<i>60</i>
<i>Figura 64 Comparativo esquinas inferiores.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 65 Comparativo esquinas superiores</i>	<i>61</i>

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1 Propiedades Materiales a Termoformar</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 2 Propiedades térmicas materiales a termoformar</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 3 Rango infrarrojo para calentamiento de lámina</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 4 Medición espesores producto original.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 5 Medición espesores producto escaladol.....</i>	<i>55</i>

RESUMEN

El proceso de termoformado de lámina gruesa (heavy-gauge) es una solución efectiva en costo-beneficio respecto a otras tecnologías de fabricación que requieren de inversiones mayores.

Una de las dificultades más importantes para establecer el termoformado de lámina gruesa cómo un proceso atractivo para reemplazar la inyección es la predicción y control de espesores finales en las partes.

La simulación en termoformado requiere de software especializado (muy pocas ofertas comerciales) y una caracterización especial de los materiales que no está disponible para la mayoría de los grados de materiales y son costosas para un productor.

Se propone una aproximación práctica a la predicción de espesores, para hacer más atractivo el uso de termoformado en los desarrollos de productos.

Para esto se diseñará una máquina para termoformado de laboratorio y se probarán los principios de los modelos a escala con la fabricación de una máquina (prototipo funcional) y moldes de un producto genérico por manufactura aditiva.

INTRODUCCIÓN

Los materiales plásticos han cambiado en gran medida la forma en que vivimos de forma acelerada desde la mitad del siglo pasado. Una de las razones es el rápido desarrollo de resinas con diferentes propiedades que solucionan problemas específicos. Podemos encontrar diferentes grados del mismo material con una cantidad de usos muy diversa y esto contribuye a que cada vez más necesidades se cubran con estos materiales.

Su relativa menor energía para procesar comparado con los metales, reducido peso, resistencia mecánica y térmica suficiente, fue clave para reemplazar partes que normalmente se fabricaban en metales, vidrio o madera.

Algunos ejemplos de esta transición han sido:

Partes vehiculares: Defensas frontales y posteriores y tanques de combustible de los vehículos que se fabricaban en chapa metálica ahora se producen en plásticos.

Electrodomésticos: Gabinetes, bandejas y anaqueles de neveras. Anteriormente se fabricaban en chapa o varilla y se recubrían.

Partes electrónicas: Carcasas de computadores, carcasas de teléfonos, carcasas de televisores, etc. Pasaron de chapa metálica a plásticos.

En este proyecto nos vamos a concentrar en partes plásticas estructurales, y estas las definimos como aquellas que cumplen una función de soporte de cargas estáticas y dinámicas, que puedan contener componentes ya sea sólidos o líquidos y que no sean de un solo uso.

Los materiales que analizaremos serán termoplásticos, sin cargas o refuerzos.

Los procesos más usados para este tipo de partes han sido la inyección, extrusión y soplado, siendo la inyección por su flexibilidad en cuanto a diversidad de materiales y diseños la más extendida. Sin embargo, la gran desventaja de la

inyección son las grandes inversiones necesarias para producir los productos. Esto deriva en una necesidad de tener un volumen alto de producción para que el proceso sea viable.

En este punto entra el termoformado de chapa gruesa o “heavy-gauge”, cómo una alternativa a la inyección de plásticos, debido a que tiene una flexibilidad similar a la inyección y unas inversiones menores en moldes y maquinaria, al ser un proceso que requiere menores presiones y temperaturas.

OBJETIVOS

GENERAL

Desarrollar una herramienta experimental para predicción de espesores en termoformado.

ESPECÍFICOS

Análisis de viabilidad de uso de manufactura aditiva para moldes de termoformado.

Diseño termoformadora prototipo.

Termoformadora prototipo fabricada.

Validación de molde y termo formadora con ensayos funcionales.

Diseño final y detallado termoformadora de escritorio

JUSTIFICACIÓN

A continuación, se plantean los usuarios a nivel industrial, tanto de áreas de I+D+i cómo de producción, para la herramienta desarrollada.

USUARIOS FINALES Y ROLES

Áreas I+D+i

En las áreas de investigación, desarrollo e innovación, puede utilizarse esta herramienta cómo paso de verificación en las etapas de:

Diseño conceptual

Diseño de detalle

Diseño para manufactura

Diseño de moldes

En estas etapas los diseñadores de producto, ingenieros de diseño y diseñadores de moldes de termoformado, podrán hacer verificaciones a escala de las distribuciones de espesores para el producto en desarrollo.

Áreas procesos, producción y calidad

En producción y calidad se podría usar la solución para:

Mejoras en productos actuales.

Puesta a punto de productos nuevos.

Caracterización y validación de capacidad de procesos.

Los usuarios serían los técnicos e ingenieros de procesos, que requieran ejecutar las validaciones mencionadas.

MARCO TEÓRICO

PROCESO DE TERMOFORMADO

Es un proceso de formado que consiste en llevar el material a la temperatura de proceso (rango termo-elástico), moldearla en una herramienta o molde, enfriar a la temperatura de estabilidad dimensional y desmoldear. (Peter Schwarzmann, 2001)

Existen varios tipos de procesos de termoformado:

Vacío en molde

Pre-soplado de lámina

Vacío o succión en lámina

Presión positiva

Pre-estirado físico

Combinaciones de estos procesos anteriores

Y varios tipos de moldes:

Núcleo

Cavidad

Compresión (núcleo y cavidad)

Sin molde (libre)

Doble cavidad "Twin Sheet"

La escogencia del tipo de proceso y tipo de molde, dependerá de las condiciones que se requieran de producto y producción.

En este caso nos concentraremos en el proceso de vacío en molde, pues es uno de los más comunes y versátiles.

Las ventajas del proceso de termoformado son diversas, sin embargo estas son las más importantes al momento de escoger este proceso:

Baja inversión en moldes

Baja inversión en máquinas

Tiempos de ciclo relativamente cortos

Flexibilidad en diseño de producto

Las desventajas más importantes serían:

Proceso abierto. Muy poco eficiente energéticamente para altos volúmenes de producción.

Casi siempre se requiere de post-procesos como corte, pintura, pegado, soldadura, perforado, etc.

Hay un porcentaje relativamente alto de desperdicio por los bordes (sujeción de la lámina) y sobrantes del postproceso.

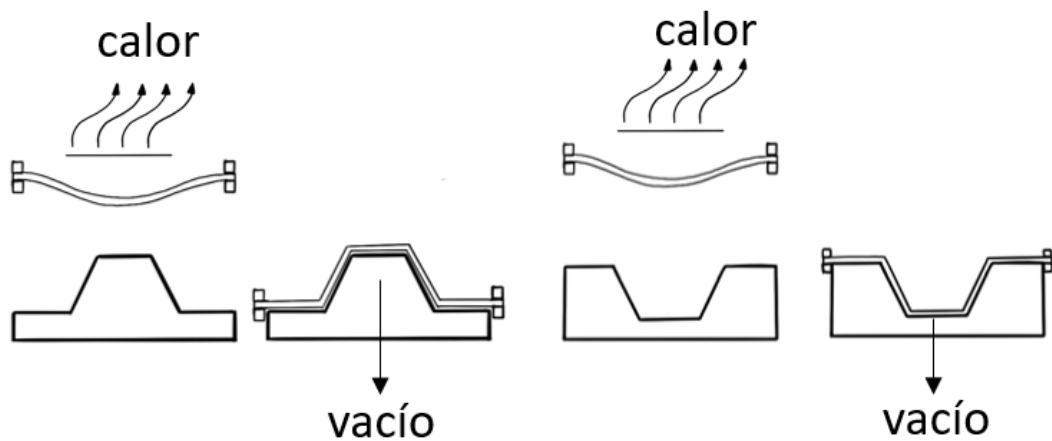


Figura 1 Termoformado por vacío en molde de Núcleo y Cavidad

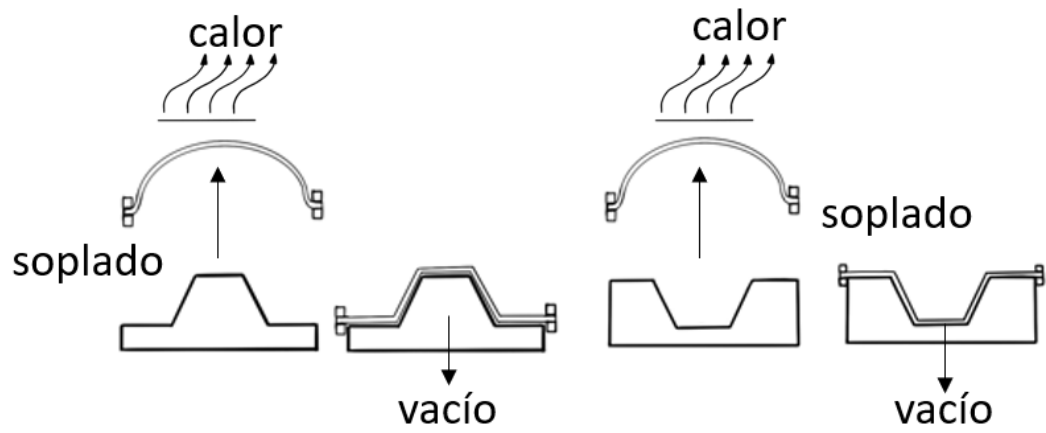


Figura 2 Termoformado por pre-soplado y vacío en molde de Núcleo y Cavidad

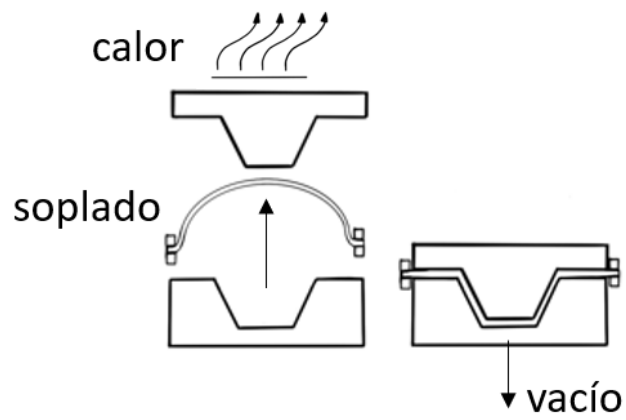


Figura 3 Termoformado por compresión, pre-soplado y vacío en molde de Núcleo y Cavidad

DESARROLLO DE PRODUCTO, MOLDES Y MÁQUINA PARA EXPERIMENTACIÓN

MOLDES DE TERMOFORMADO

Al ser un proceso de baja presión, la posibilidad de materiales para los moldes se amplía respecto a otros procesos. Los materiales más usados son:

Madera.

Resinas con o sin refuerzos.

Aluminio.

Acero.

Normalmente la fabricación de moldes se realiza por medio de mecanizado CNC, sin embargo, en este estudio vamos a explorar el uso de manufactura aditiva con materiales que puedan resistir varios ciclos de termoformado.

DISEÑO DEL PRODUCTO TERMOFORMADO

La primera decisión para tomar es el tipo de molde a usar (Núcleo o Cavidad / Positivo o Negativo).

En este caso escogeremos el molde positivo o núcleo (Figura 4), debido a que es más fácil manufacturar este molde en manufactura aditiva.

Las distribuciones de espesores deben comportarse de la forma mostrada en la figura 4. Sin embargo, para la facilidad en proceso, añadiremos ángulos de salida que pueden distorsionar dicha distribución.

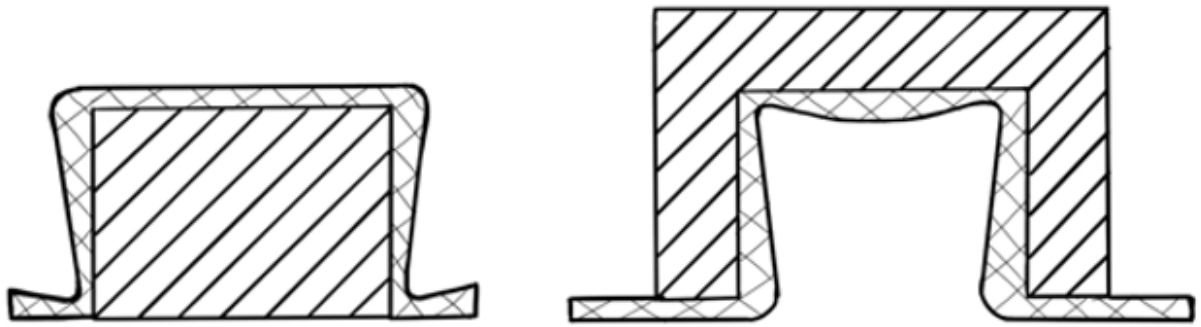


Figura 4 Molde Positivo y Negativo (Peter Schwarzmann, 2001)

Parámetros usados para el diseño

Para el diseño del producto a termoformar tomamos en cuenta las dimensiones máximas de la impresora 3D disponible para la impresión del molde (250 mm x 210 mm x 210 mm).

El espesor comercial que tenía disponible estaba entre 0.5mm y 2mm.

El área de sujeción la determinó el tamaño del horno que tenemos disponible (200mm x 250mm).

La altura y ángulo de salida se determinó de forma que el espesor promedio no superara el 30% del espesor inicial (ver cálculo de espesores promedio).

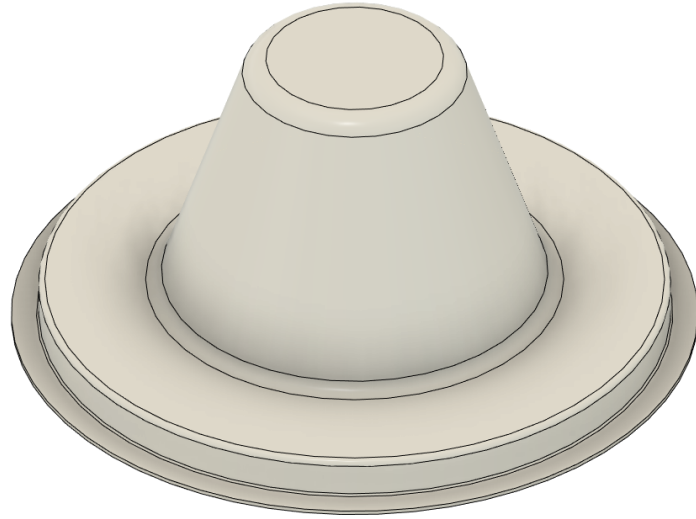


Figura 5 Pieza a termoformar

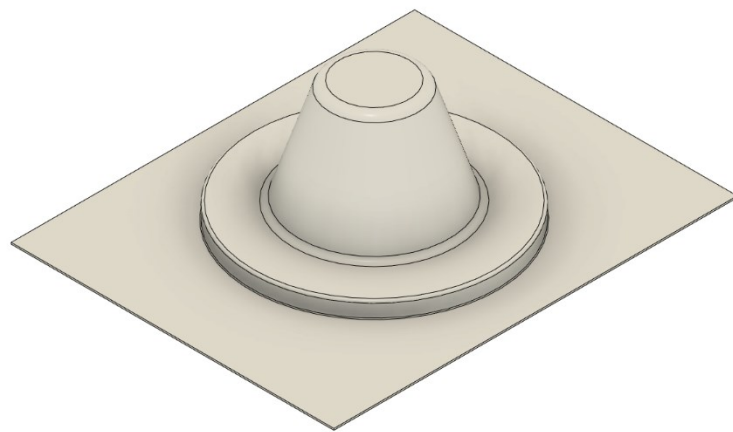


Figura 6 Pieza termoformada con sujeción

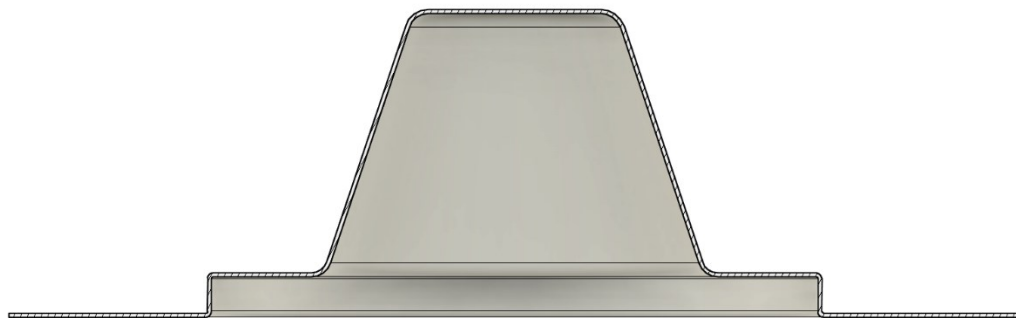


Figura 7 Pieza termoformada sección transversal

Escalamiento del producto termoformado

Para comprobar la hipótesis de este trabajo, se escalará al 50% el producto termoformado.

De las dos partes se fabricarán moldes y se probarán con láminas con la misma proporción de escalado.

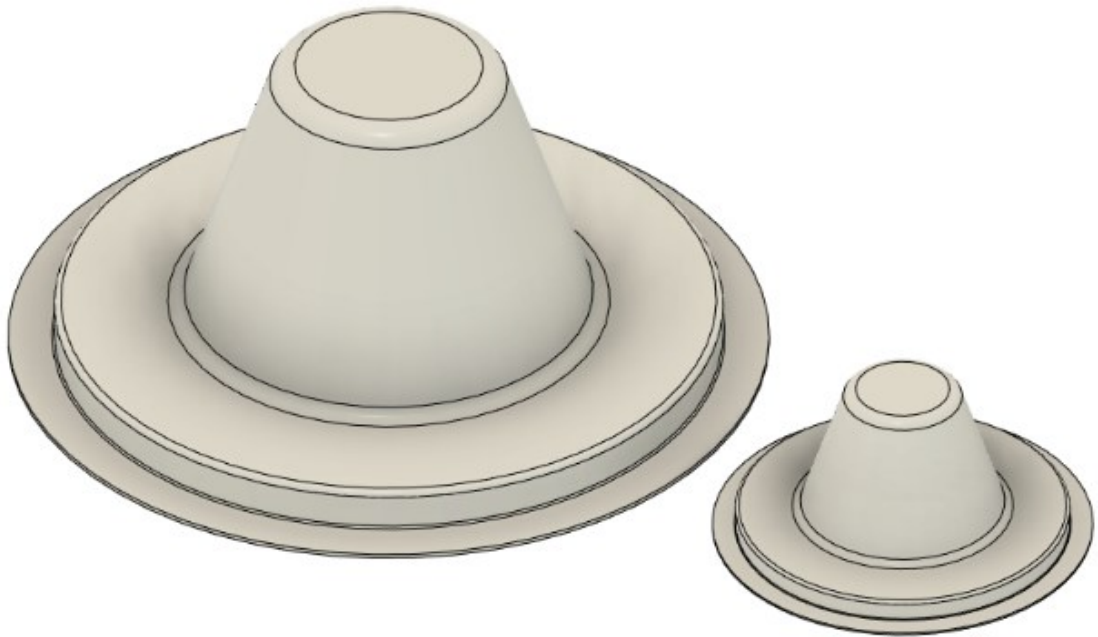


Figura 8 Producto termoformado original y escalado

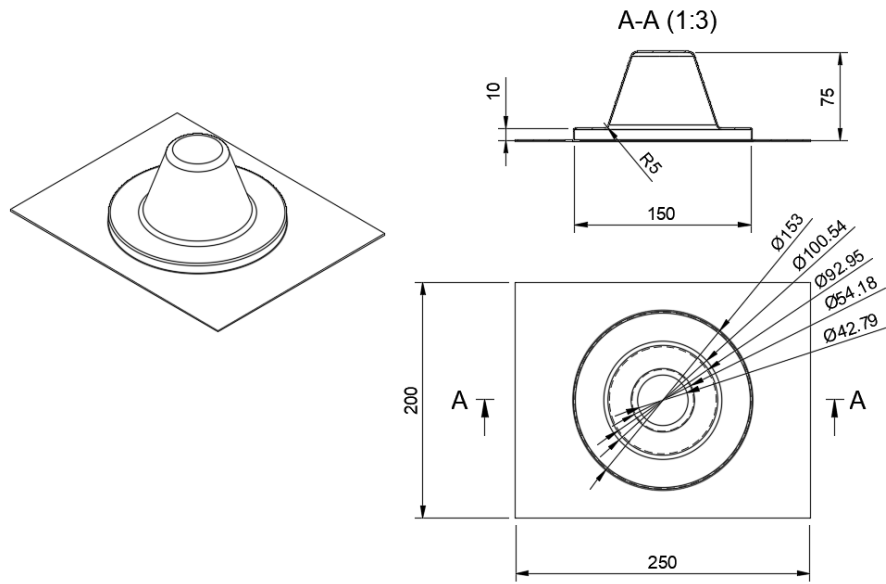


Figura 9 Plano producto termoformado

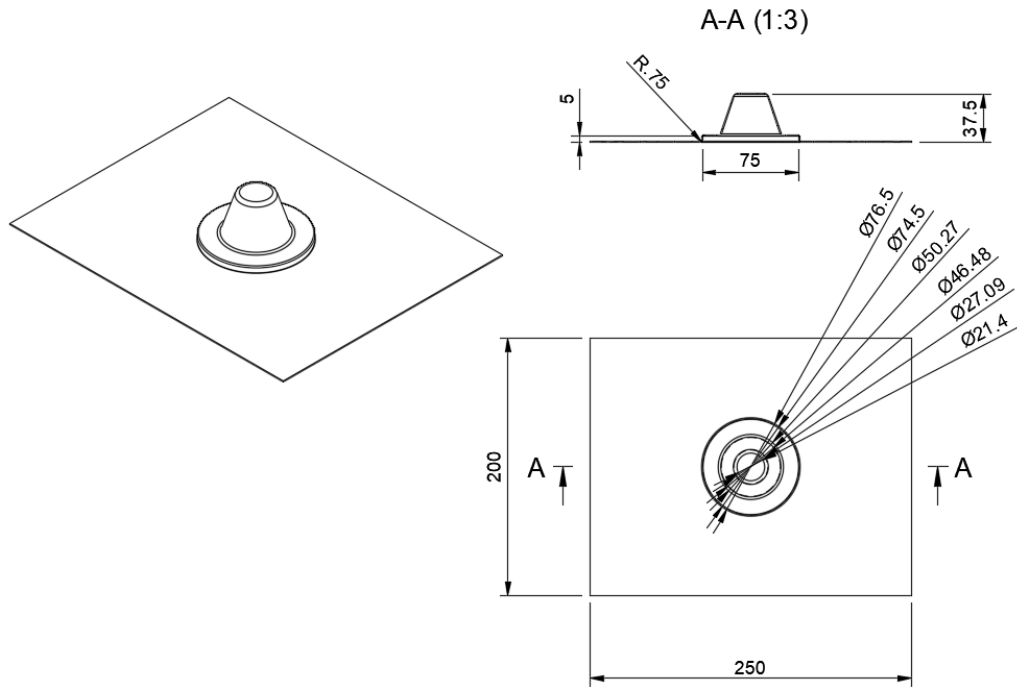


Figura 10 Plano producto termoformado escalado al 50%

ANÁLISIS TEÓRICO DE PREDICCIÓN DE ESPESORES EN MODELOS A ESCALA

Selección e información de los materiales a termoformar

Tenemos la posibilidad de termoformar HIPS (poliestireno de alto impacto) y ABS (Acrilo Nitrilo Butadieno-Estireno). Sin embargo, por las temperaturas requeridas de proceso y sabiendo que los moldes se fabricarán en ABS, vamos a trabajar con lámina de HIPS.

Material	MFI	Tvicat	Tg	Temperatura de proceso	Draw ratio
HIPS	2.8 g/10 min	102°C	80 - 113°C	163-204°C	8:1
ABS	1,4 g/10 min	104°C	80 - 125°C	150 - 204°C	10:1

Tabla 1 Propiedades Materiales a Termoformar

*ficha técnica ideplast

*Throne tabla 2.15 pág 97 (Throne, Technology of Thermoforming, 1996)

Calentamiento lámina

Determinaremos el tiempo de calentamiento para las láminas que tenemos disponibles.

Los espesores son:

Espesor producto original = 1 mm

Espesor producto escalado = 0.5 mm

El calentamiento se realizará por medio de resistencias cerámicas, para esto utilizamos el modelo de calentamiento práctico que nos indica (Peter Schwarzmann, 2001)

Material	Rango primario de absorción infrarrojo (μm)	Rango secundario de absorción infrarrojo (μm)	Factor de calentamiento	Factor de enfriamiento
PS / HIPS	3,2 - 3,6	6,4 - 7,3	1,3	0,97
ABS	2,8 - 3,6	6,4 - 7,3	1,3	1,3

Tabla 2 Propiedades térmicas materiales a termoformar

*Throne tabla 2.14 pág 94 (Throne, Technology of Thermoforming, 1996)

*Illig tabla 2.4 pág 32 (Peter Schwarzmann, 2001)

Material	Rango de absorción infrarrojo (μm)	Rango ideal de temperatura para fuente de calor radiante (°C)
PS / HIPS (primario)	3,2 - 3,6	510 - 630
PS / HIPS (secundario)	6,4 - 7,3	120 - 180

Tabla 3 Rango infrarrojo para calentamiento de lámina

*Throne tabla 3.5 pág 132 (Throne, Technology of Thermoforming, 1996)

$$t_h = k_1 \times k_2 \times k_3 \times k_4 \times e$$

$k_1 =$ *Factor de posición del elemento calentador*

$k_1 = 8 (650^\circ\text{C} - 450^\circ\text{C} - \text{Temperatura superior e inferior})$

$k_2 =$ *Factor de material*

$$k_2 = 1.3 \text{ (ver tabla)}$$

$k_3 = \text{Factor de espesor}$

$$k_3 = e < 5 \text{ mm} = 1$$

$$e > 5 \text{ mm} = \frac{e}{4}$$

$$k_3 = 1$$

$k_4 = \text{Factor de impresión}$

$k_4 = \text{impresión normal } 0.9 \text{ a } 1.2$

$k_4 = \text{impresión detallada } 1.2 \text{ a } 1.8$

$$k_4 = 1$$

*Illig cap. 5.4.1 pág 138

(Peter Schwarzmann, 2001)

$$t_h = 8 \times 1.3 \times 1 \times 1 \times 1$$

$t_h = 10.4 \text{ s} - \text{Para el producto termoformado original}$

$$t_h = 8 \times 1.3 \times 1 \times 1 \times 0.5$$

$t_h = 5.2 \text{ s} - \text{Para el producto termoformado escalado}$

Enfriamiento del producto

En el experimento a realizar utilizaremos el método de enfriamiento libre de superficie, con convección natural. Los factores para esta decisión son:

Espesores muy bajos (entre 0.1 y 1 mm), de rápido enfriamiento.

No se requiere regular la temperatura del molde, porque son muestras experimentales, no de producción.

Cálculo espesores

Ahora procedemos al cálculo de los espesores promedio de acuerdo con el modelo práctico mostrado en (Peter Schwarzmann, 2001)

Teniendo en cuenta que el material escogido es HIPS, no debemos superar en 1:8 la reducción de espesor, es decir (0.125 mm para la lámina de 1mm y 0.0625 mm para la lámina de 0.5mm).

$V_1 = \text{Volúmen lámina sin termoformar}$

$V_2 = \text{Volúmen lámina termoformada}$

$A_1 = \text{Área lámina sin termoformar}$

$A_2 = \text{Área lámina termoformada}$

$e_1 = \text{Espesor promedio inicial}$

$e_2 = \text{Espesor promedio final}$

$$V_1 = V_2$$

$$A_1 \times e_1 = A_2 \times e_2$$

$$e_2 = \frac{A_1}{A_2} \times e_1$$

*Illig cap. 3.13 pág 64 (Peter Schwarzmann, 2001)

$$A_1 = 23506.24 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = 76683.141 \text{ mm}^2$$

$$e_1 = 1 \text{ mm}$$

$$e_2 = \frac{23506.24 \text{ mm}}{76683.141 \text{ mm}} \times 1 \text{ mm}$$

$$e_2 = 0.306 \text{ mm}$$

$$A_1 = 5876.559 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = 19170.785 \text{ mm}^2$$

$$e_1 = 0.5 \text{ mm}$$

$$e_2 = \frac{5876.559 \text{ mm}}{19170.785 \text{ mm}} \times 0.5 \text{ mm}$$

$$e_2 = 0.153 \text{ mm}$$

El espesor promedio en la parte original será de 0.306 mm y para el producto escalado es de 0.153 mm, están por encima del máximo permitido del material. Sin embargo, parte del análisis debe verificar las zonas que presenten el mayor estiramiento y tomar decisiones de diseño de producto para corregirlas.

DISEÑO DE MÁQUINA A ESCALA PROTOTIPO FUNCIONAL Y DISEÑO DE DETALLE

Concepto

Exploramos la posibilidad de realizar pruebas funcionales con un equipo económico, usando un horno eléctrico y una aspiradora para los elementos funcionales básicos (fuente de calor y de vacío).

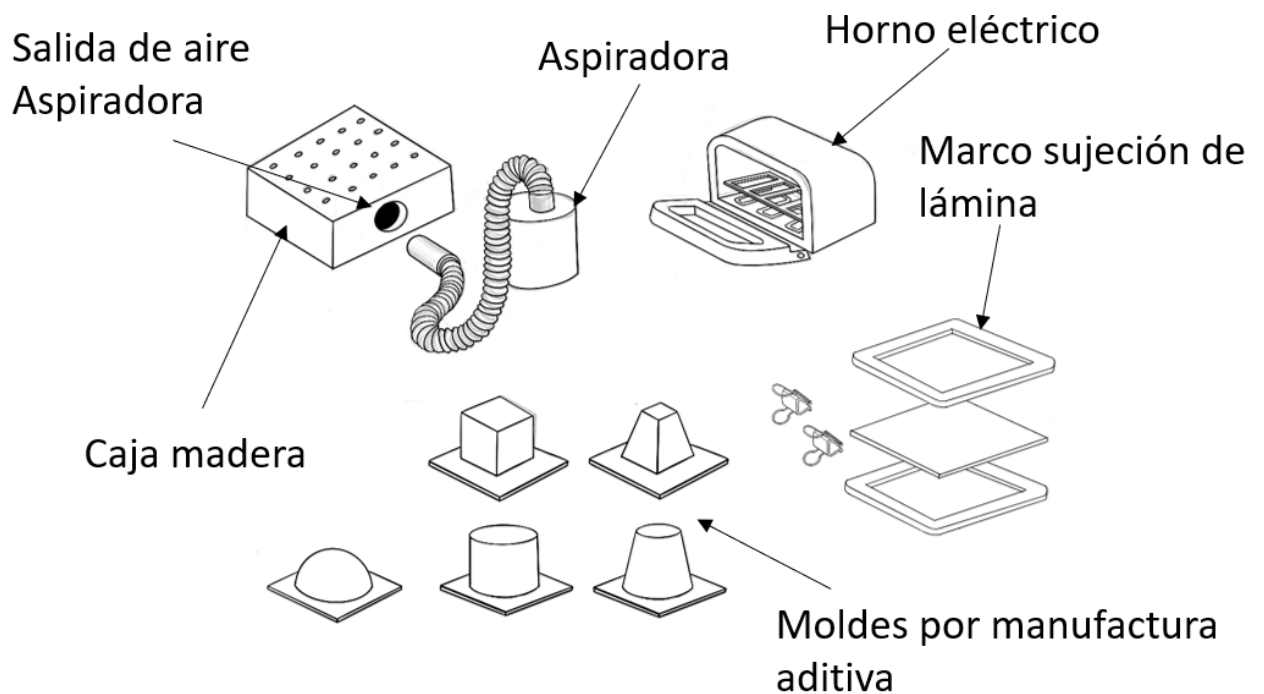


Figura 11 Concepto inicial termoformadora

Se conceptualiza también la termoformadora de escritorio, que se fabricaría en una etapa posterior. Este sería el equipo que utilizarían las áreas de diseño de producto para validar las distribuciones de espesores de sus productos a escala.

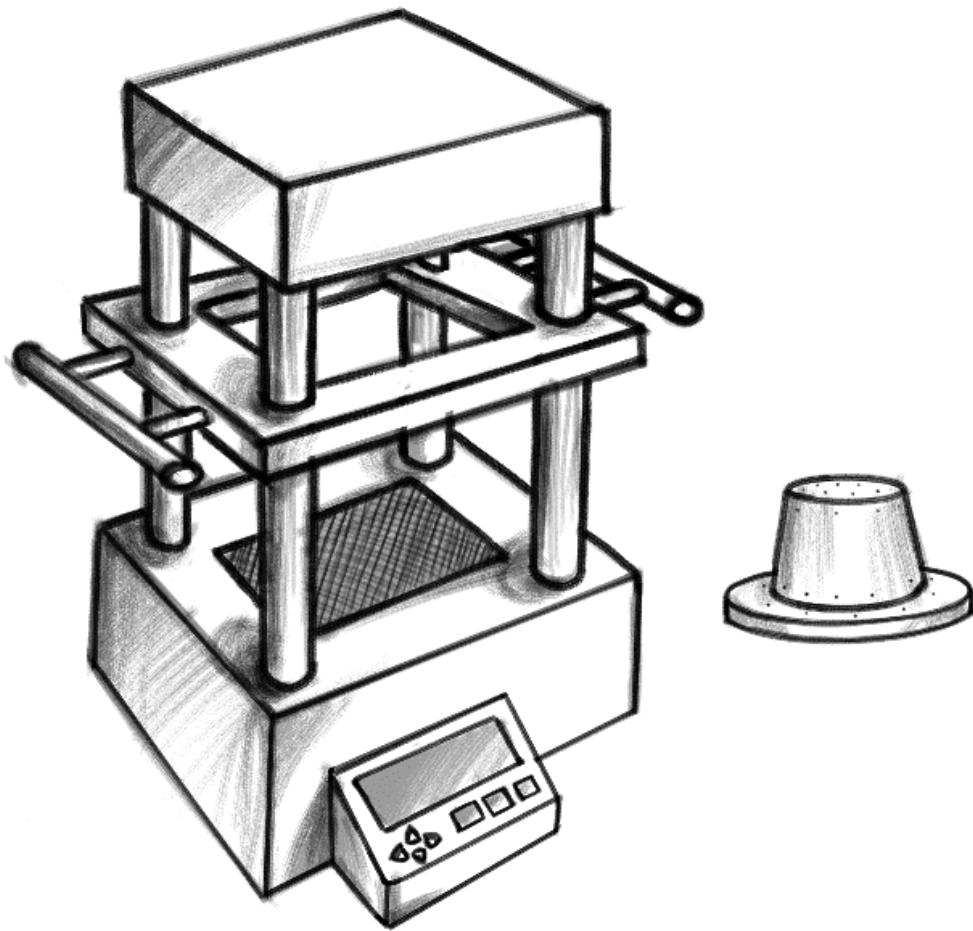


Figura 12 Concepto final termoformadora de escritorio

Diseño de detalle – Termoformadora prototipo a escala

A continuación, se dimensiona y diseñan los componentes a fabricar (caja, marco y molde).

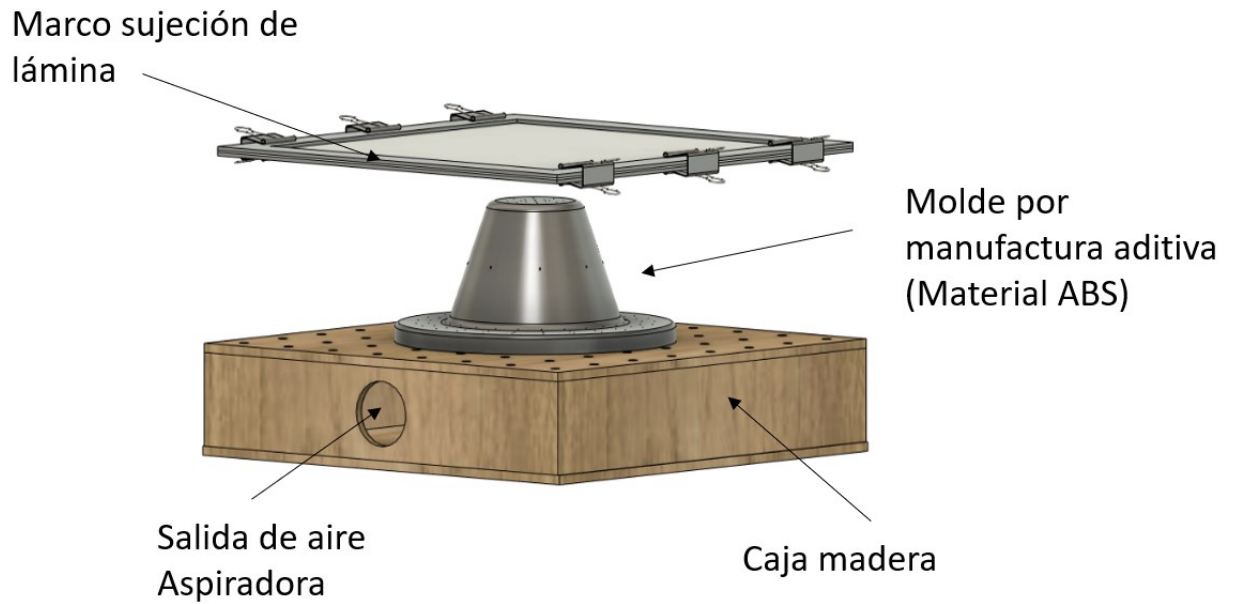


Figura 13 Diseño detalle prototipo funcional

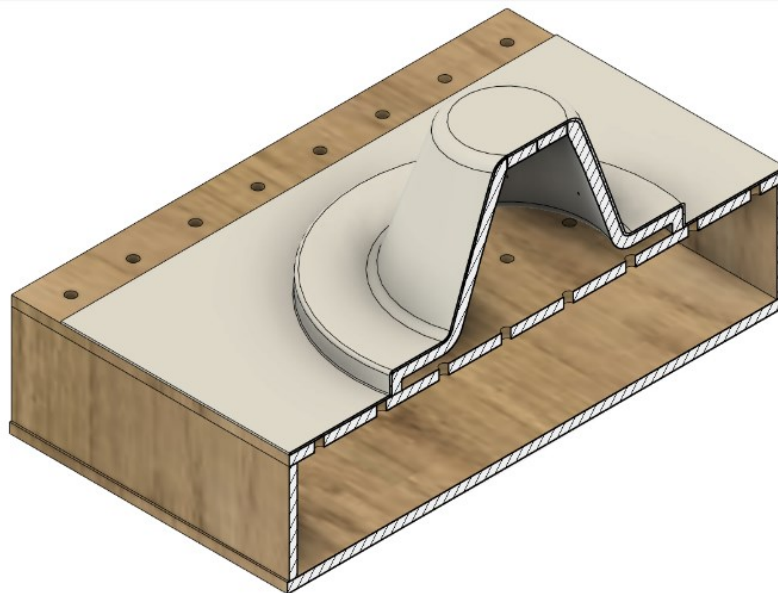


Figura 14 Sección transversal prototipo funcional

Fabricación máquina a escala prototipo

A continuación, se fabrica la caja en madera y sellamos con silicona las esquinas para garantizar la hermeticidad.

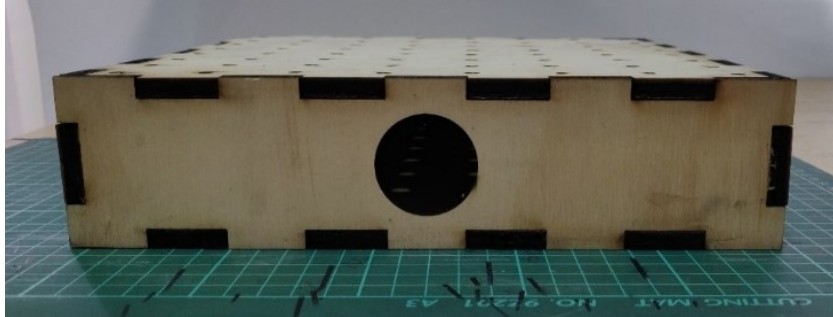


Figura 15 Caja madera vista frontal

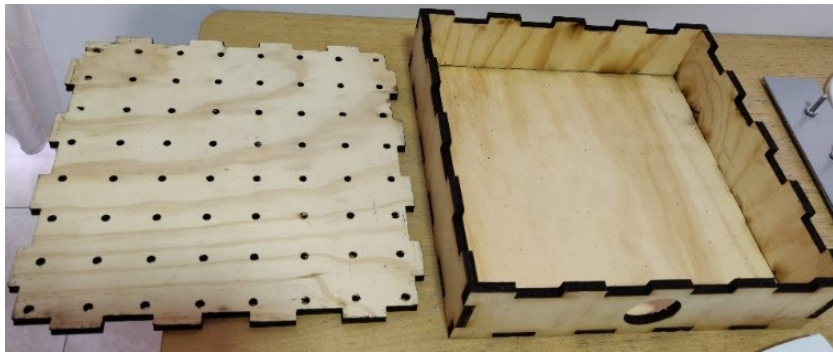


Figura 16 Caja madera desarmada

Fabricamos el marco, por facilidad usamos dos placas de acero con tornillos / tuercas. En la figura 18 se muestra la forma de sujeción de la lámina.

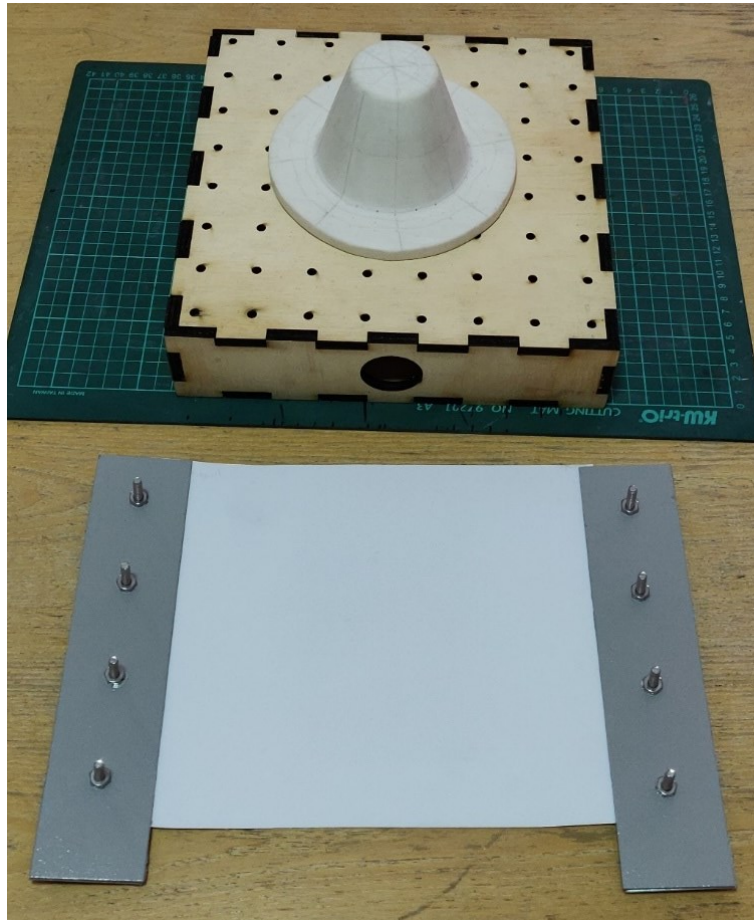


Figura 17 Caja madera / Molde / Marco sujeción

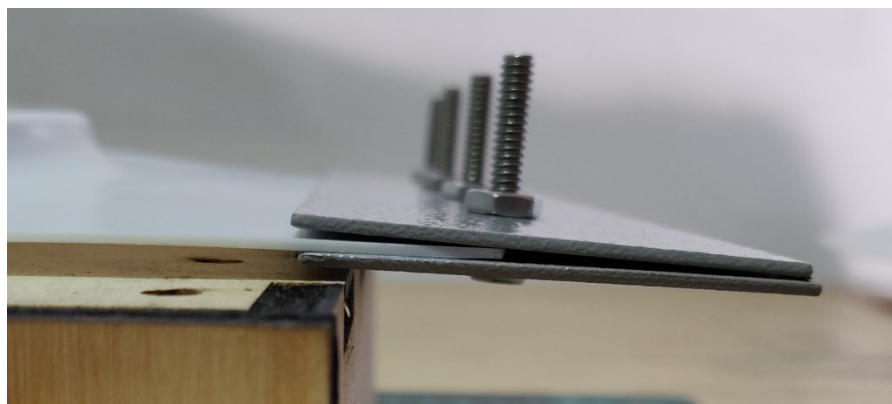


Figura 18 Marco sujeción

Diseño molde

El diseño del molde se acondiciona para manufactura aditiva. Se dejan los espacios y la pared suficiente para mecanizar los vacíos necesarios para el proceso (ver imagen 19).

Utilizamos ABS como material de impresión porque su temperatura de ablandamiento es mayor a la del material a termoformar HIPS. Además, no es de uso continuo la máquina, entonces no existe restricción por la poca conductividad térmica de este material.

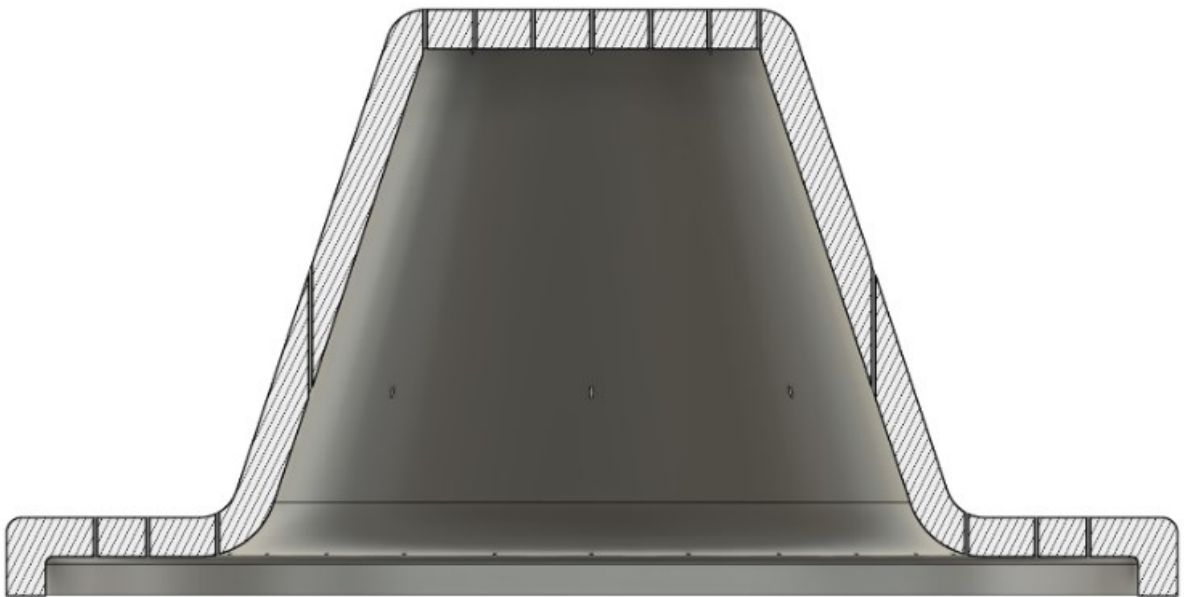


Figura 19 Sección transversal molde

Dejamos un espacio mínimo de 30 mm por lado para la sujeción de la lámina, en la figura 20 se aprecian las pestañas laterales que servirá para ensamblar al marco de sujeción.

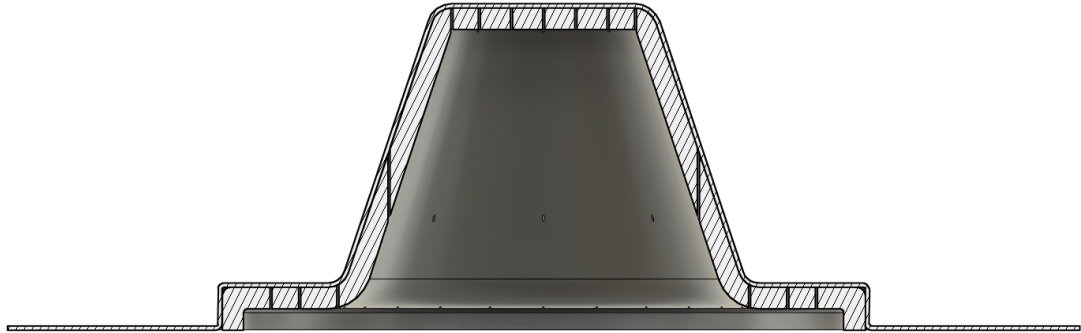


Figura 20 Molde y lámina

Las perforaciones de vacío en el molde se fabrican con un diámetro de 0.8mm. La distribución se hace sobre las partes planas del molde y el radio de la base para asegurar la llegada de la lámina hasta esta superficie.

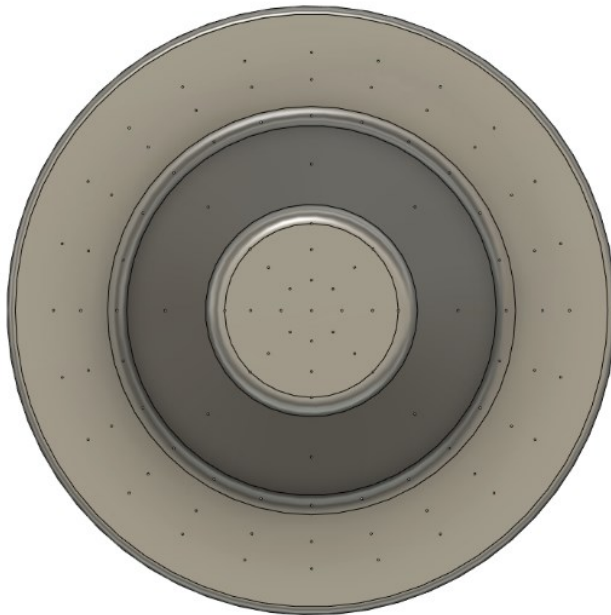


Figura 21 Distribución vacíos en el molde

Moldes fabricados

La fabricación de los moldes se ejecuta en una máquina de impresión 3D por FDM. El filamento usado es ABS y el interior de la pieza está al 100% para asegurar la integridad mecánica. Las superficies exteriores se pulen manualmente para facilitar el desmoldeo de las partes.

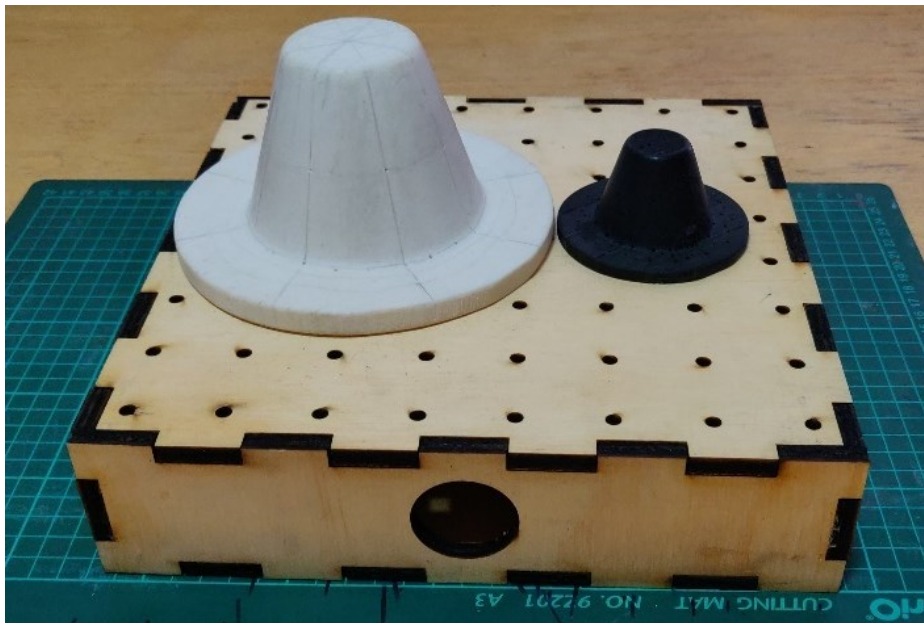


Figura 22 Moldes partes original y escalada

Como post-proceso adicional, se perforan los vacíos en la superficie del molde. Utilizamos una broca de 0.8mm y se distribuyen en las caras planas y radios o zonas difíciles de formar.

Perforaciones vacíos 0.8mm

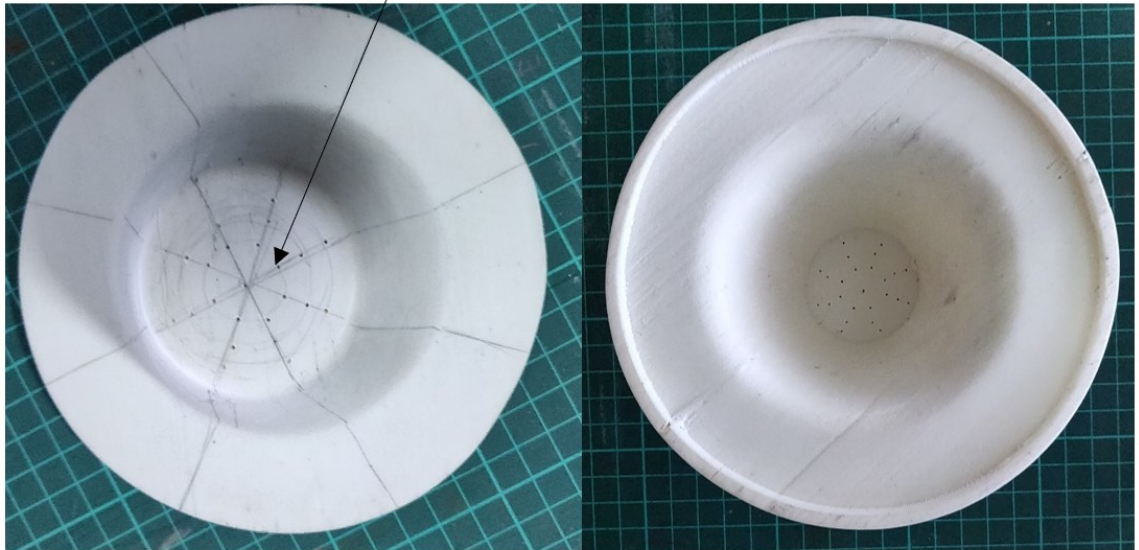


Figura 23 Molde original - detalle vacíos



Figura 24 Molde escalado - detalle vacíos

DISEÑO MÁQUINA PARA LABORATORIO (DISEÑO DE DETALLE)

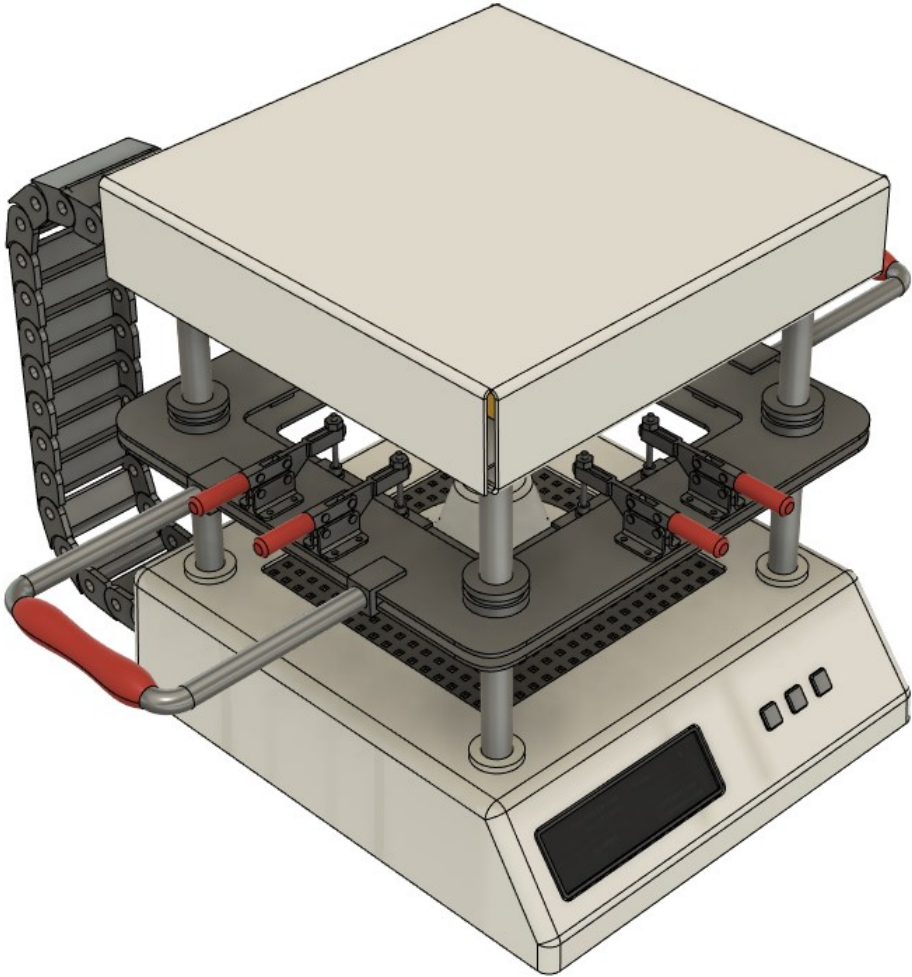


Figura 25 Diseño de detalle termoformadora de escritorio

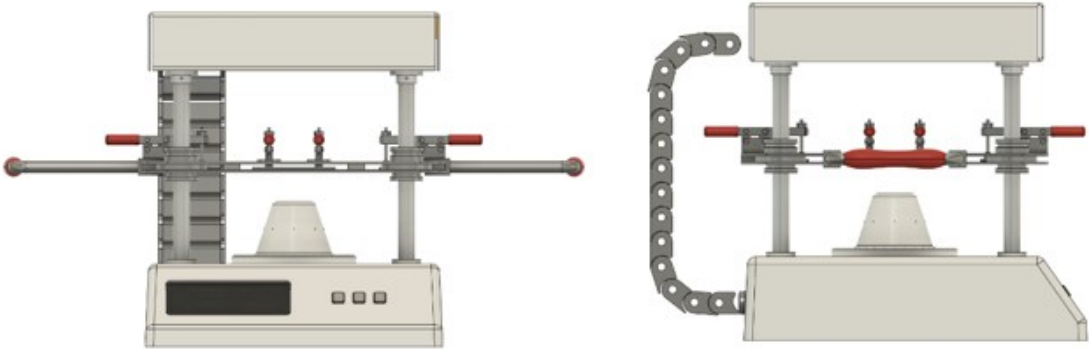


Figura 26 Frontal - Lateral Termoformadora de escritorio

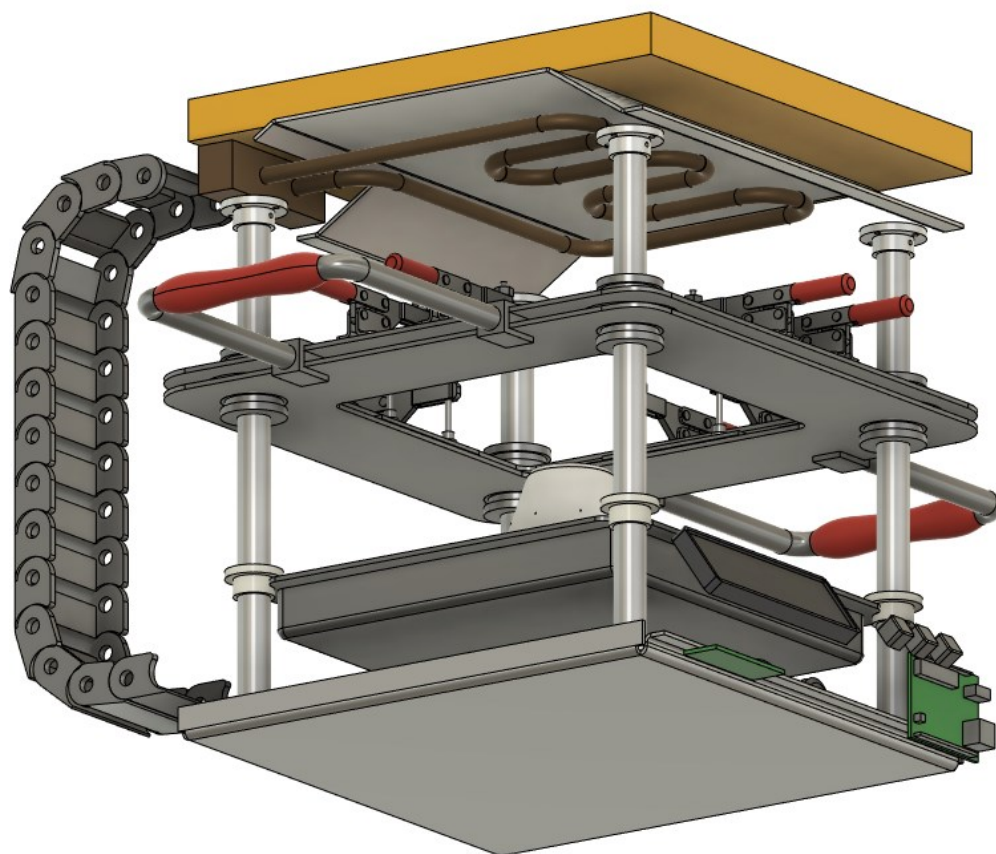


Figura 27 Conjunto funcional termoformadora de escritorio

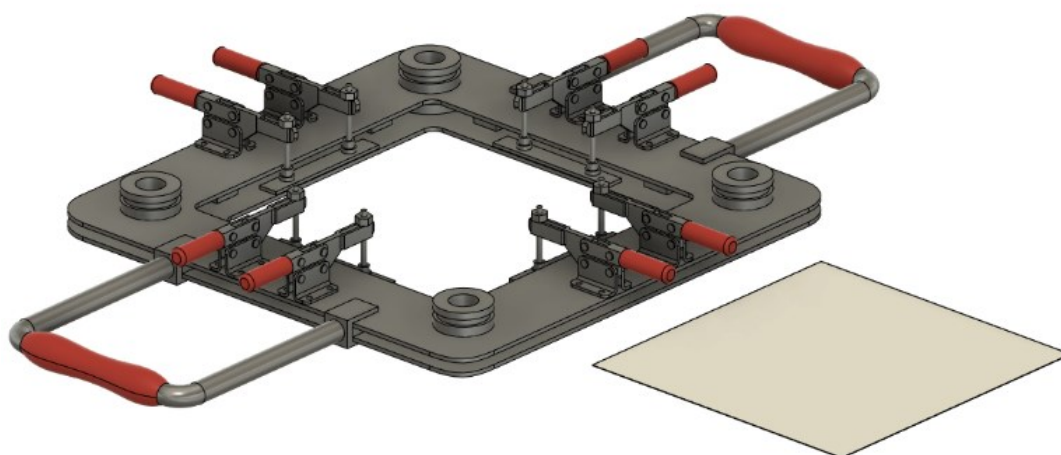


Figura 28 Clamp lámina termoformadora de escritorio

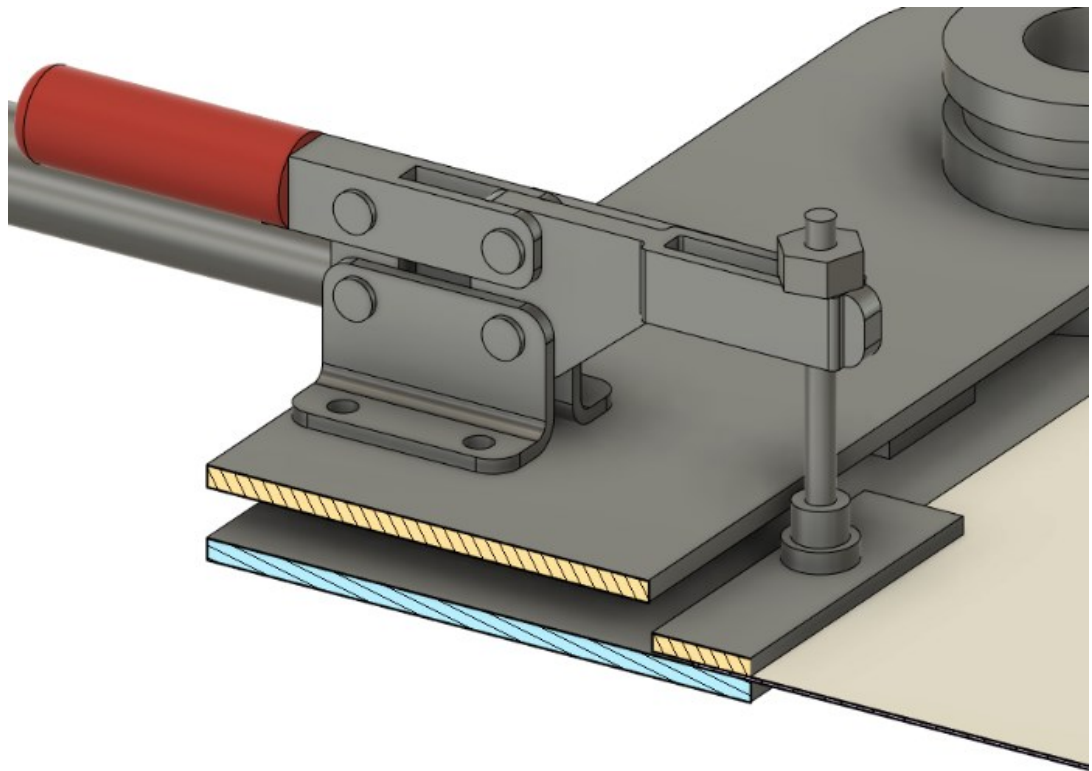


Figura 29 Detalle clamps de sujeción de lámina

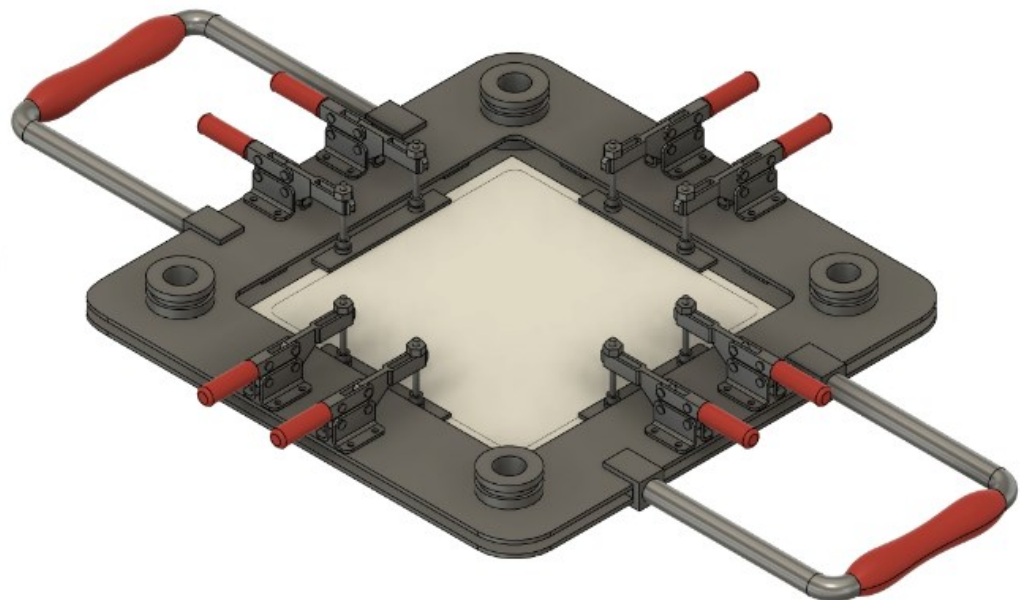


Figura 30 Conjunto funcional clamp de lámina

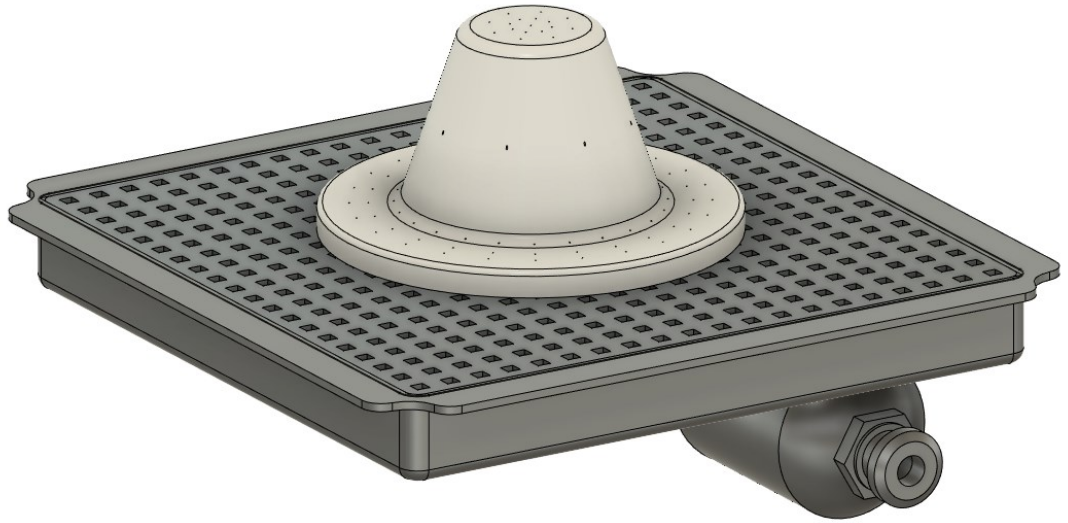


Figura 31 Conjunto funcional vacío para molde

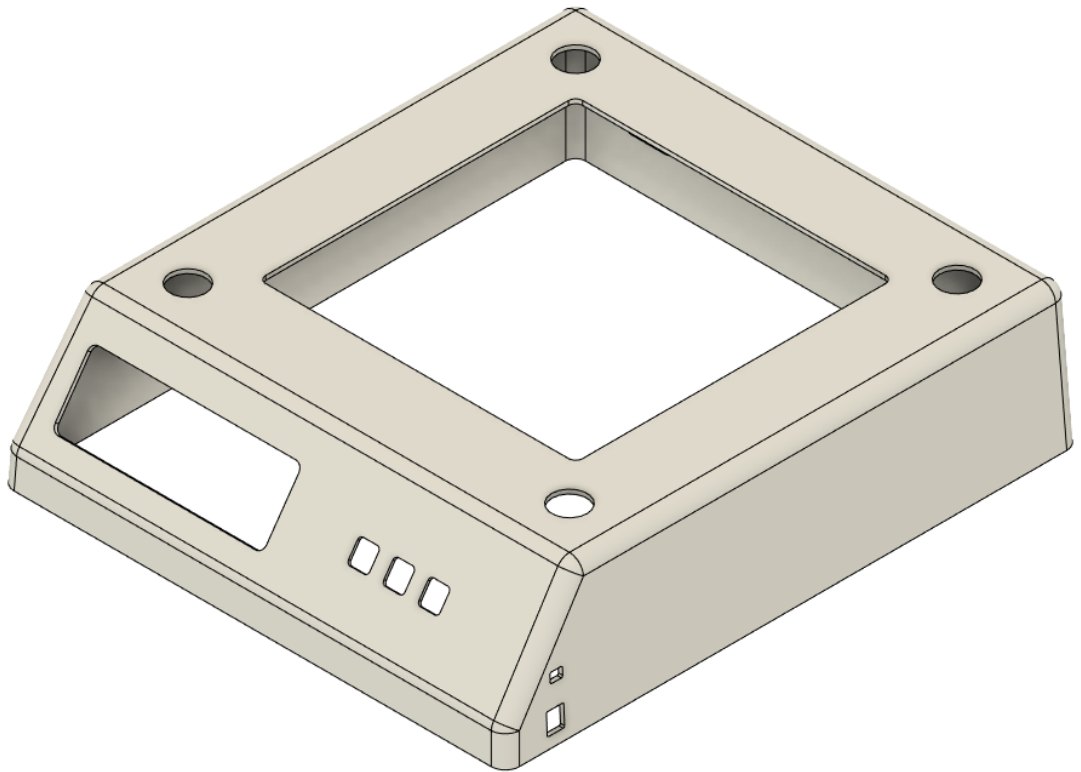


Figura 32 Carcasa termoformada

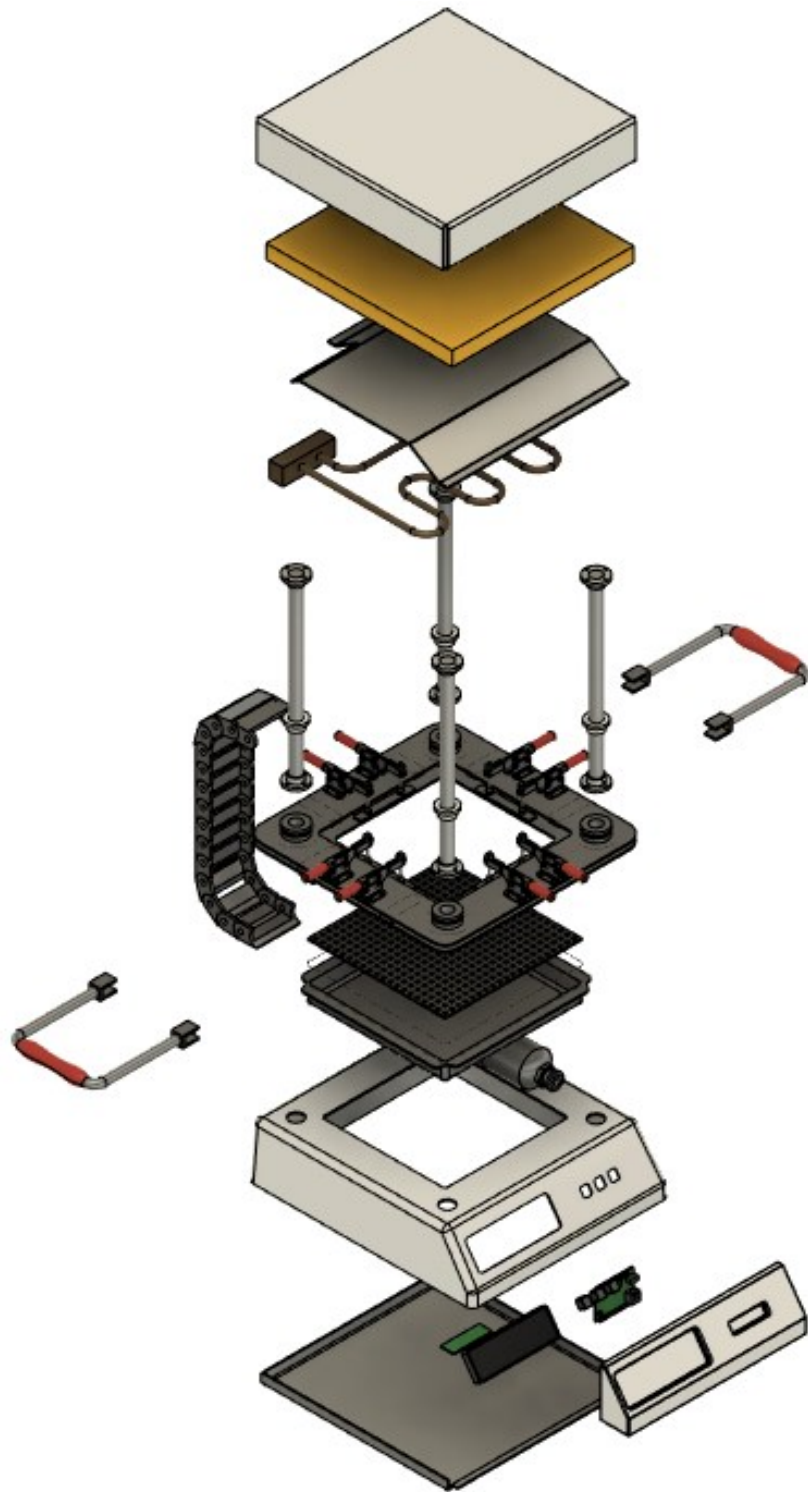


Figura 33 Vista explosión máquina termoformadora de escritorio

RESULTADOS

EXPERIMENTACIÓN A ESCALA

Preparamos el prototipo funcional de la máquina con una aspiradora de 1300W y un horno eléctrico con resistencias que puede llegar a temperaturas de 250°C

Setup de termoformadora a escala y molde

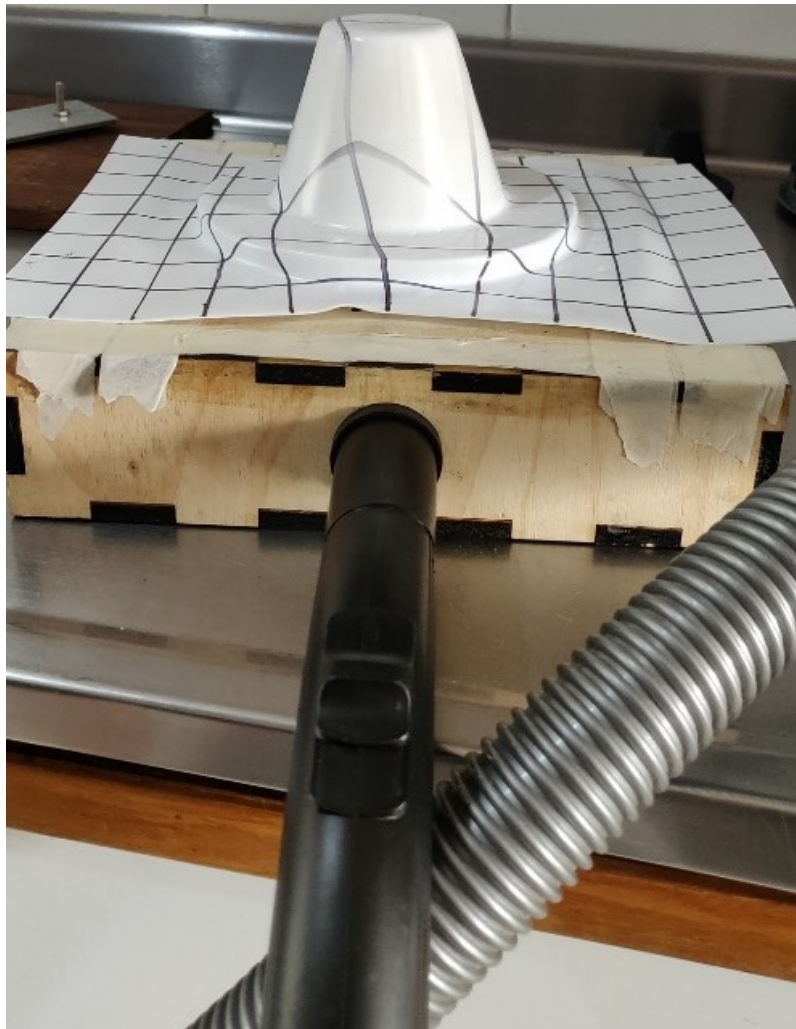


Figura 34 Prototipo funcional

Usamos los clamps de acero para sostener la lámina en el horno, hasta una temperatura aproximada de 130°C, medidos con una cámara termográfica.

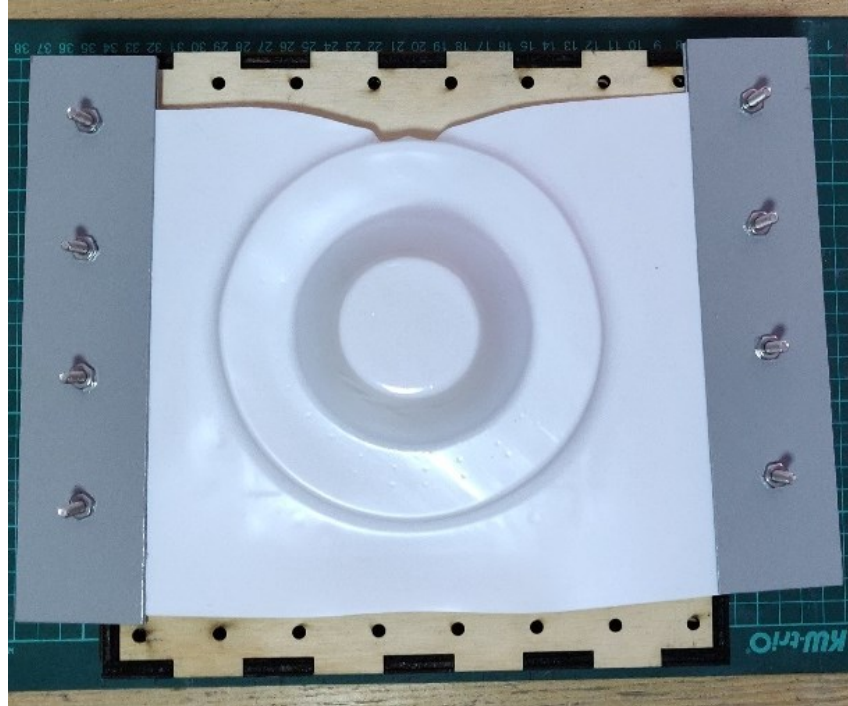


Figura 35 Setup termoformadora vista superior



Figura 36 Setup termoformadora vista frontal

Puesta a punto del proceso

Antes de tener partes buenas tuvimos que ajustar varios parámetros en el termoformado. Estos fueron:

Temperatura y tiempo de estadía en el horno. Para láminas de 0.5mm usamos 12 segundos a 200°C y para lámina de 1mm usamos 20 segundos a 200°C

Aumentar el diámetro de entrada de aire al molde y a la caja de madera.

Mejorar el flujo en la aspiradora removiendo el filtro.



Figura 37 Partes puesta a punto molde original



Figura 38 Partes puesta a punto molde escalado

Resultados termoformado parte original

Buscamos obtener la mejor distribución de calor en la lámina antes de termoformar (ver anexos / termografías). A continuación se muestran los mejores resultados obtenidos y de los cuales elegiremos las muestras para la medición de espesores.



Figura 39 Parte original termoformada frontal

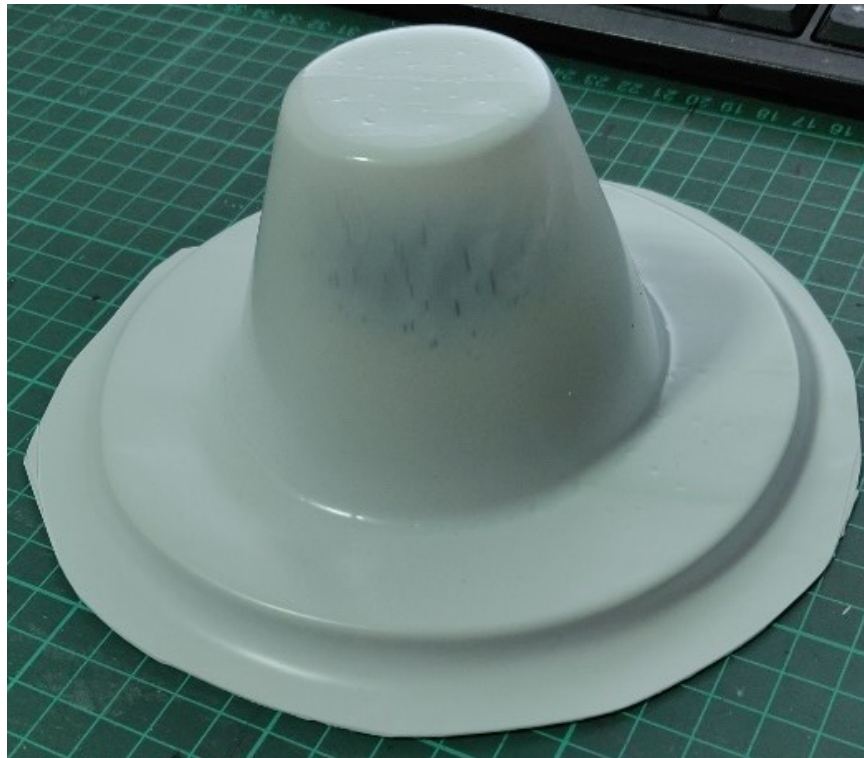


Figura 40 Parte original termoformada cortada

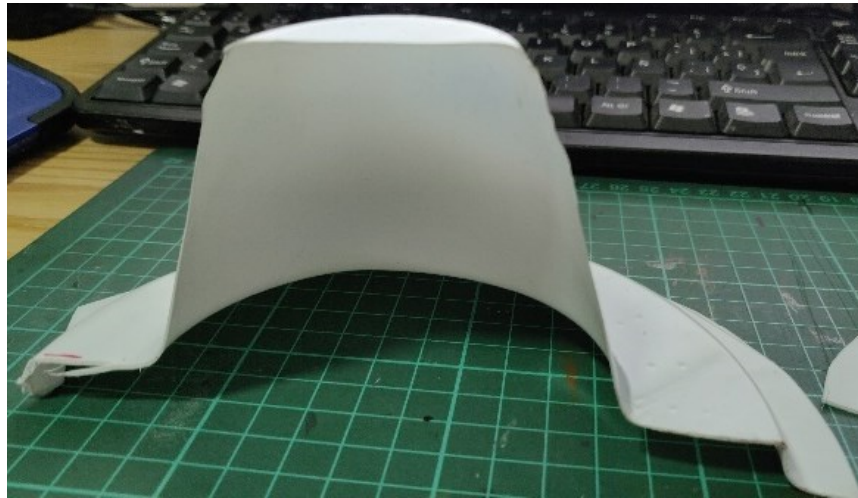


Figura 41 Parte original termoformada sección transversal

Para revisar la distorsión y poner a punto el proceso, hacemos cuadrículas para ajustar y balancear la distribución de calor en la lámina.

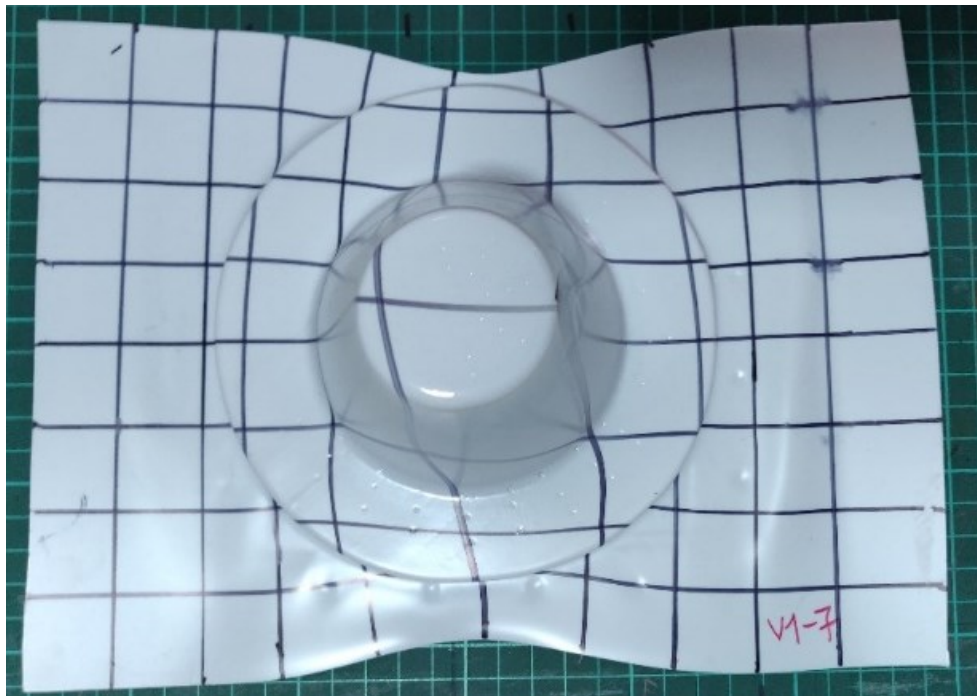


Figura 42 Parte original termoformada distorsión

Resultados termoformado parte escalada

De la misma forma que en la parte original, ejecutamos los ensayos en el molde escalado.

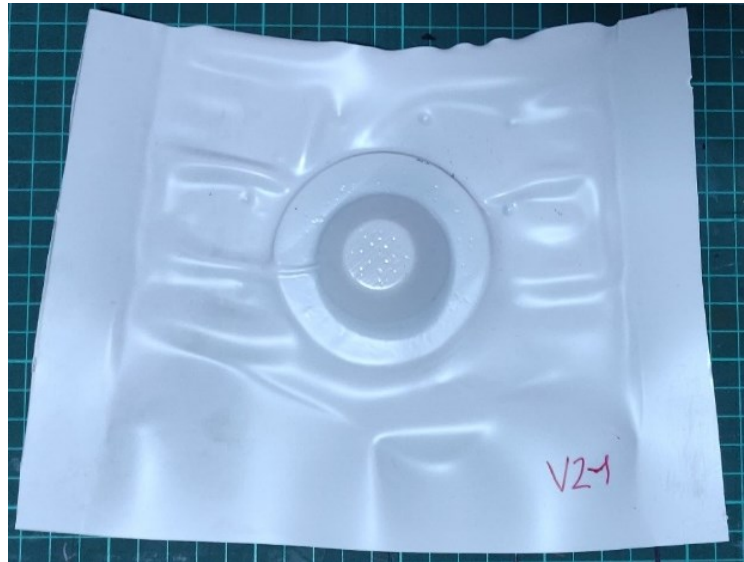


Figura 43 Parte escalada termoformada superior

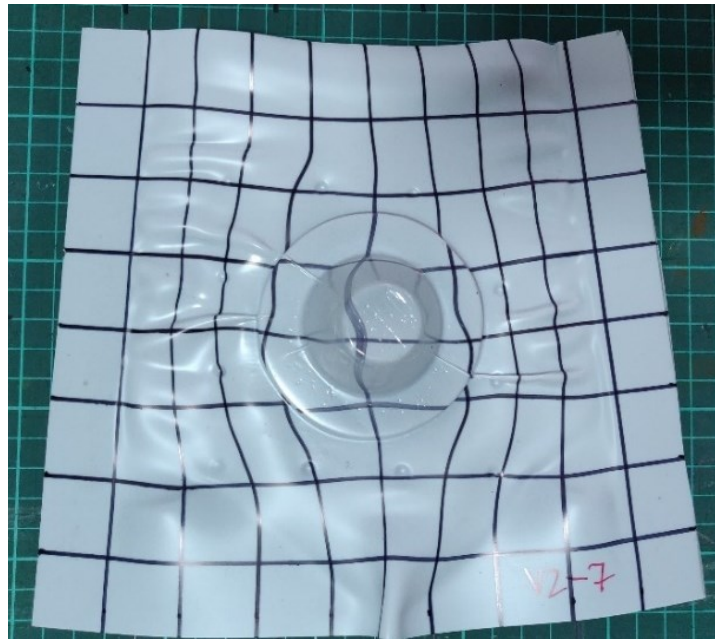


Figura 44 Parte escalada termoformada distorsión

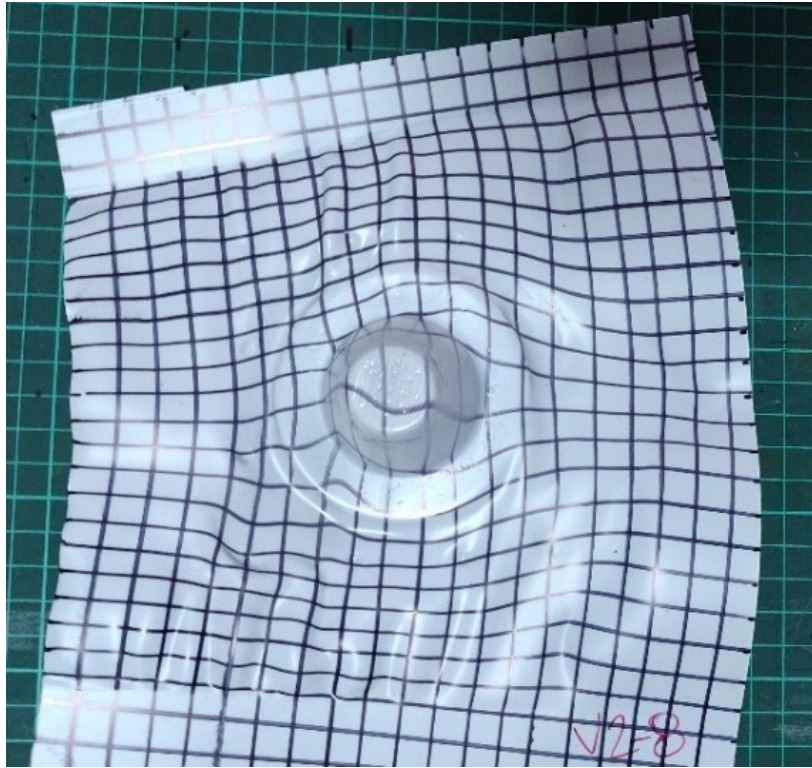


Figura 45 Parte escalada termoformada distorsión cuadros más pequeños

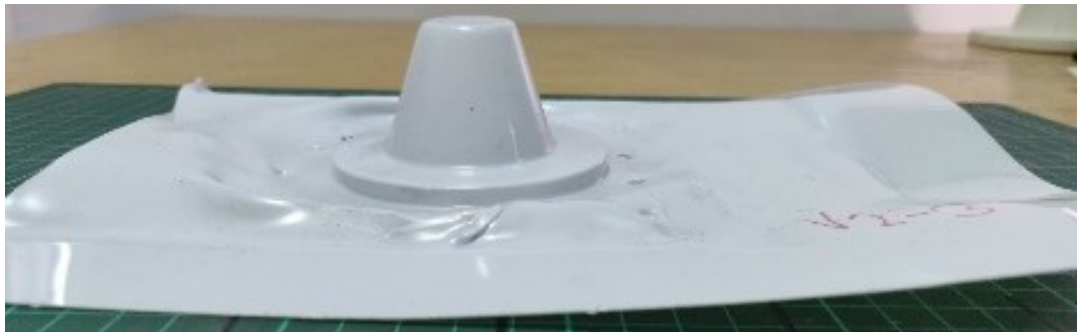


Figura 46 Parte escalada termoformada frontal

TERMOGRAFÍAS Y MEDICIÓN DE TEMPERATURAS

Para garantizar una temperatura óptima para termoformado, utilizamos una cámara térmica para revisar tanto la distribución del calor en la lámina, cómo la temperatura óptima para termoformar (a partir de 120°C)

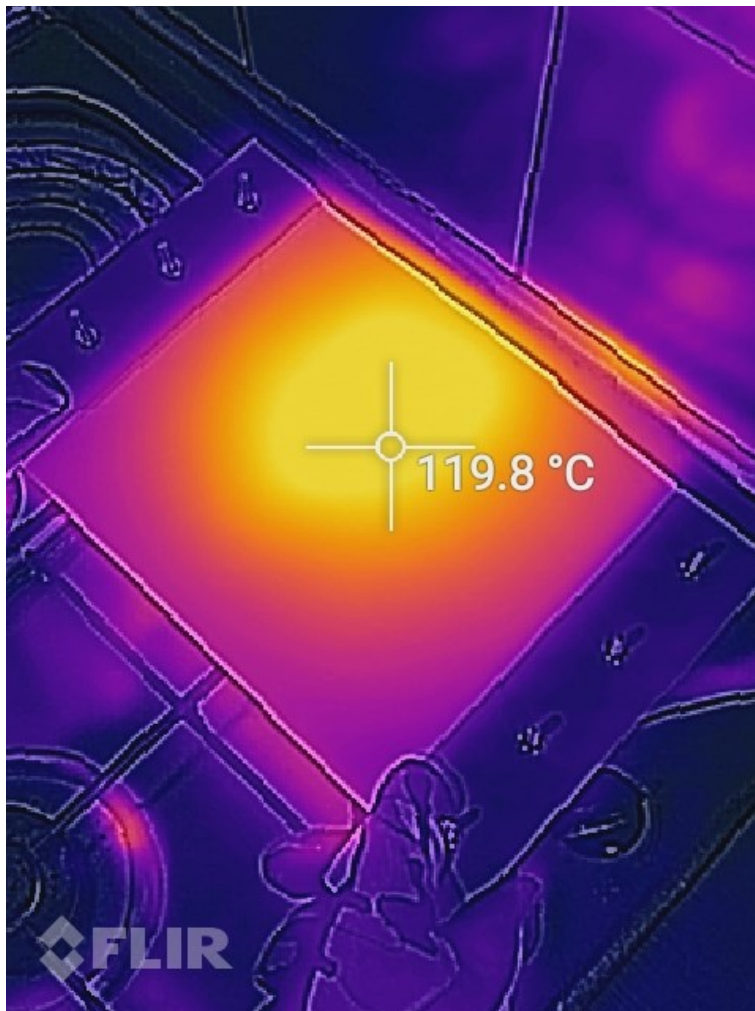


Figura 47 Termografía lámina en horno

También nos ayudó a identificar una desbalance térmico en el molde, que pudo haber sido causado por corrientes de aire en la cara frontal (ver fig. 48).

Las posibles causas y soluciones para este desbalance se mencionan en el análisis de datos.

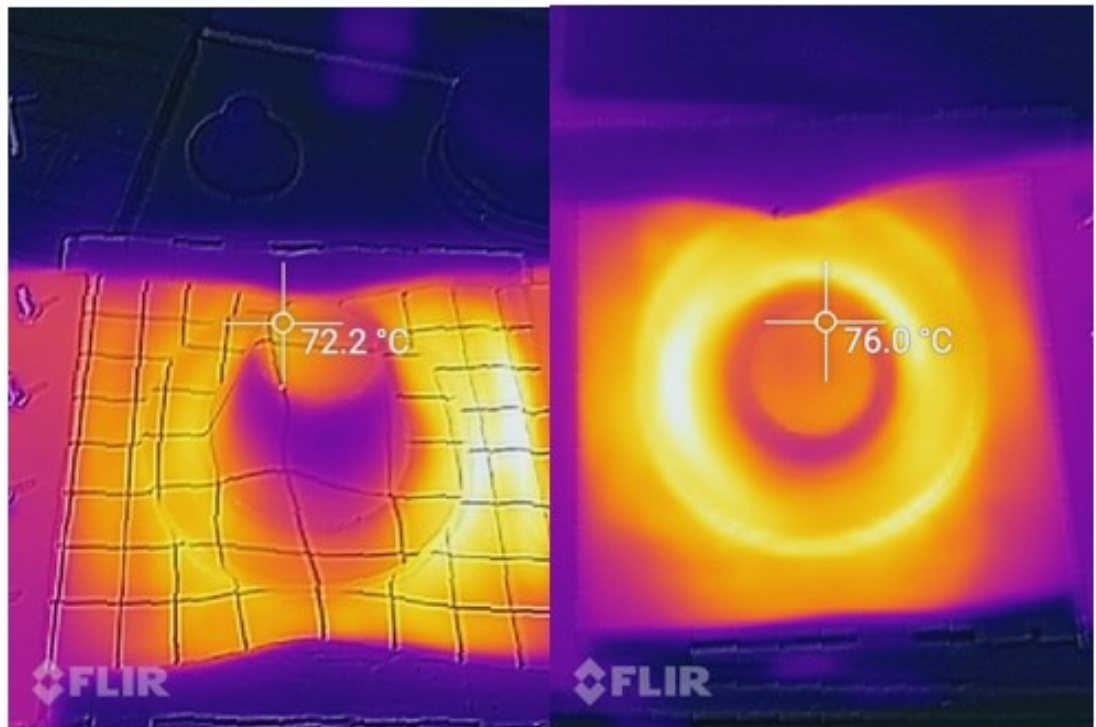


Figura 48 Termografía lámina en molde

El detalle de las termografías tomadas, se encuentra en los anexos de este documento.

Posibles consecuencias y soluciones mediciones térmicas

En los procesos de procesamiento de plásticos el control de temperaturas en los componentes que interactúan es crítico. El calor que le entrega la máquina al material y que posteriormente debe retirar el molde, debe estar en un equilibrio determinado para asegurar la calidad y productividad del proceso.

En este caso, uno de los mayores inconvenientes que tuvimos en el calentamiento de la lámina y posterior termoformado, es la ausencia de un ambiente controlado y encerramientos para los componentes. El calentamiento de la lámina se realizó en un horno “abierto”, donde la distribución de temperaturas puede variar en su volumen. El molde se encontraba en una zona con corrientes de aire que pudo enfriar la parte frontal de forma acelerada entre termoformados.

Lo que podemos esperar es una variación de espesores en las zonas frontales mostradas (ver figura 48), lo cual comprobaremos en la siguiente etapa de medición de espesores.

Una posible solución para este desbalance es realizar las pruebas en un ambiente controlado en temperatura, garantizando el balance correcto sin una influencia significativa del ambiente.

En el diseño del equipo final, se pueden incluir barreras que aislen la zona de moldeo y para materiales en lo que se requieran mayores temperaturas de procesamiento (ABS o PC), se pueden incluir ventiladores para enfriamiento forzado y controlado.

Mediciones espesores

Para medir espesores usamos un método destructivo de muestras (fig. 50) y tomamos los puntos que se ven en la figura 49. Utilizamos un micrómetro para dichas mediciones en 6 muestras de cada modelo.

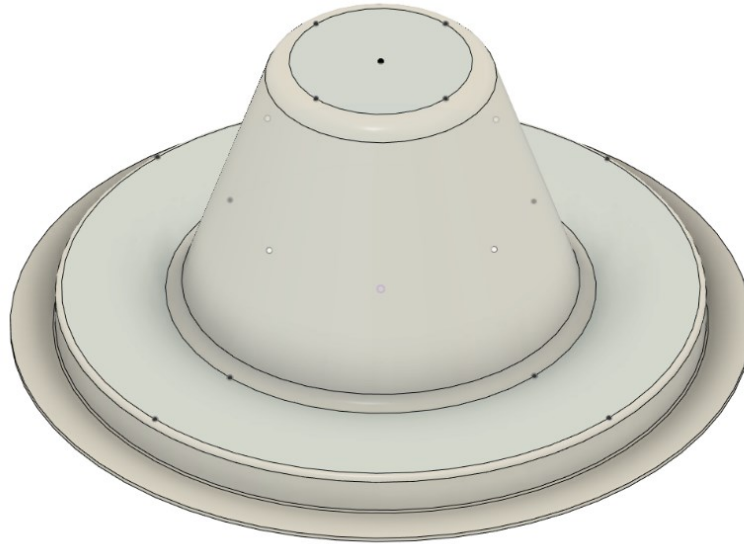


Figura 49 Puntos de medición de espesores

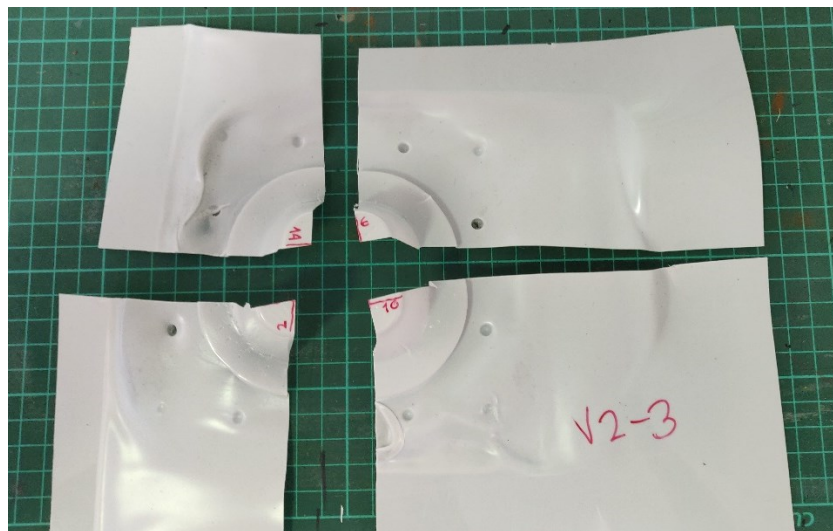


Figura 50 Corte de muestras para medición de espesores

Mediciones espesores producto termoformado original

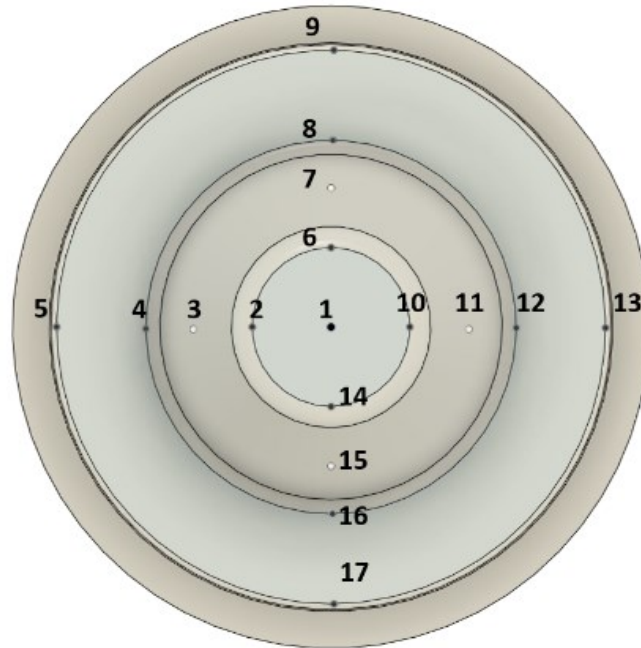


Figura 51 Medición producto original

Mediciones	V1 - 1	V1 - 2	V1 - 3	V1 - 4	V1 - 5	V1 - 6	Promedio
1	0,57	0,15	0,22	0,26	1,1	0,2	0,42
2	0,55	0,46	0,32	0,44	1	0,36	0,52
3	0,6	0,34	0,13	0,11	0,6	0,04	0,30
4	0,97	1,1	0,94	1	0,91	0,65	0,93
5	1,05	1,06	1	1,05	1	0,98	1,02
6	0,68	0,3	0,13	0,1	1	0,52	0,46
7	0,13	0,33	0,07	0,05	0,9	0,11	0,27
8	0,72	1,06	0,79	0,15	1	0,64	0,73
9	0,87	1,01	0,8	0,44	1,1	0,76	0,83
10	0,51	0,1	0,31	0,35	1,05	0,26	0,43
11	0,19	0,11	0,16	0,12	0,32	0,09	0,17
12	1,16	1,1	1	1,05	0,75	0,94	1,00
13	1,11	1,1	1,1	1,1	1,05	1,04	1,08
14	0,51	0,16	0,33	0,6	1,05	0,18	0,47
15	0,48	0,11	0,13	0,12	0,38	0,11	0,22
16	0,98	0,7	0,6	0,74	1,02	0,52	0,76
17	1,07	0,85	0,76	0,81	1,01	0,7	0,87
Promedio	0,715	0,591	0,517	0,499	0,896	0,476	0,616
Desv Est	0,313	0,417	0,370	0,387	0,242	0,336	0,304

Tabla 4 Medición espesores producto original

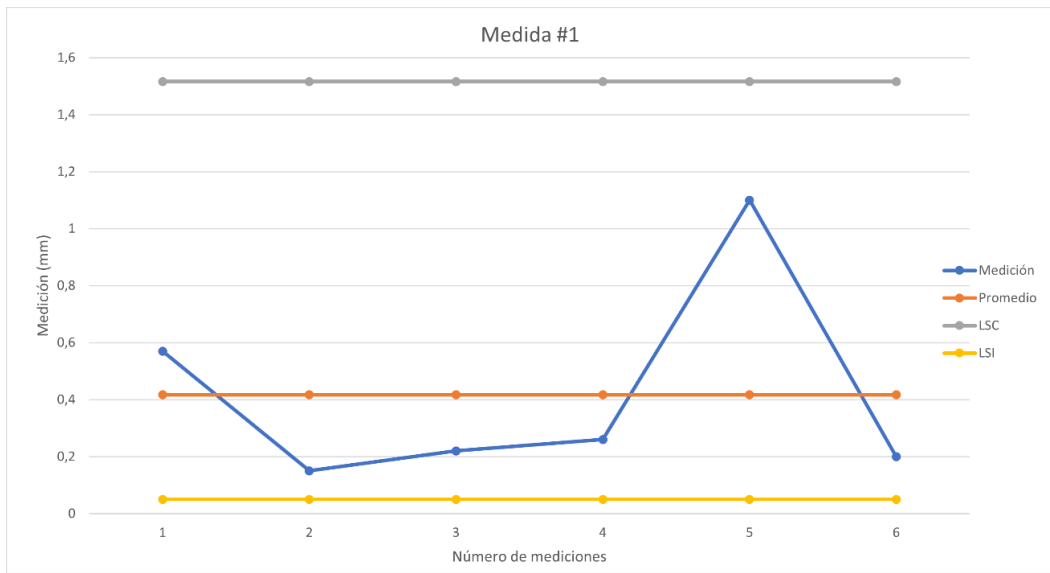


Figura 52 Carta control medida 1 producto original

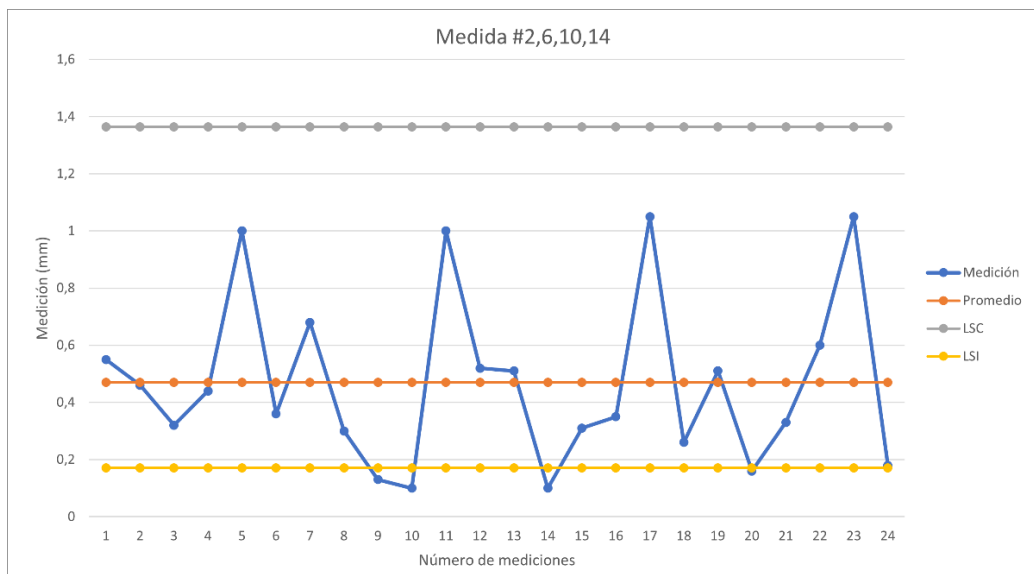


Figura 53 Carta control medida 2,6,10,14 producto original

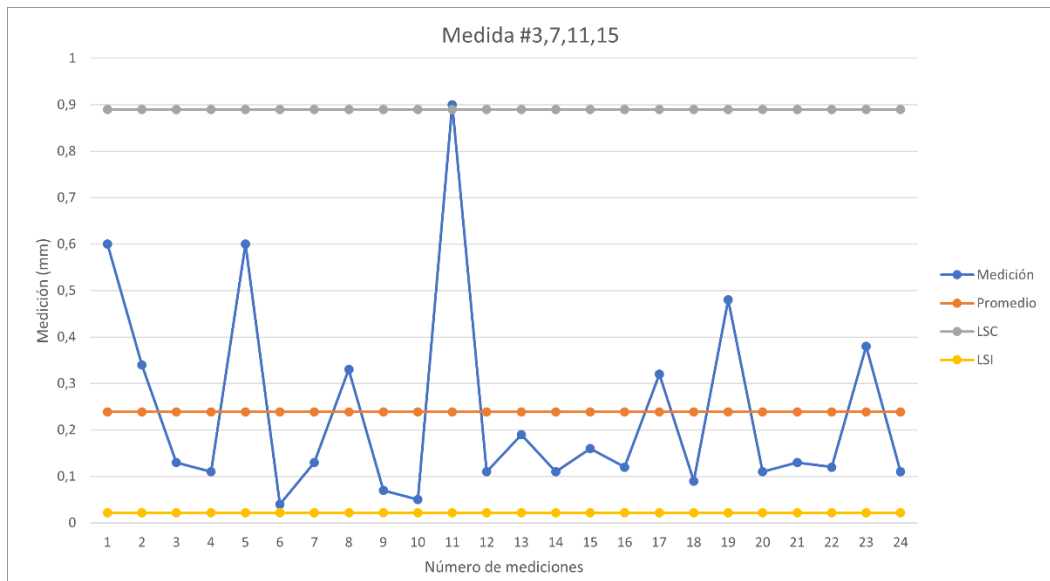


Figura 54 Carta control medida 3,7,11,15 producto original

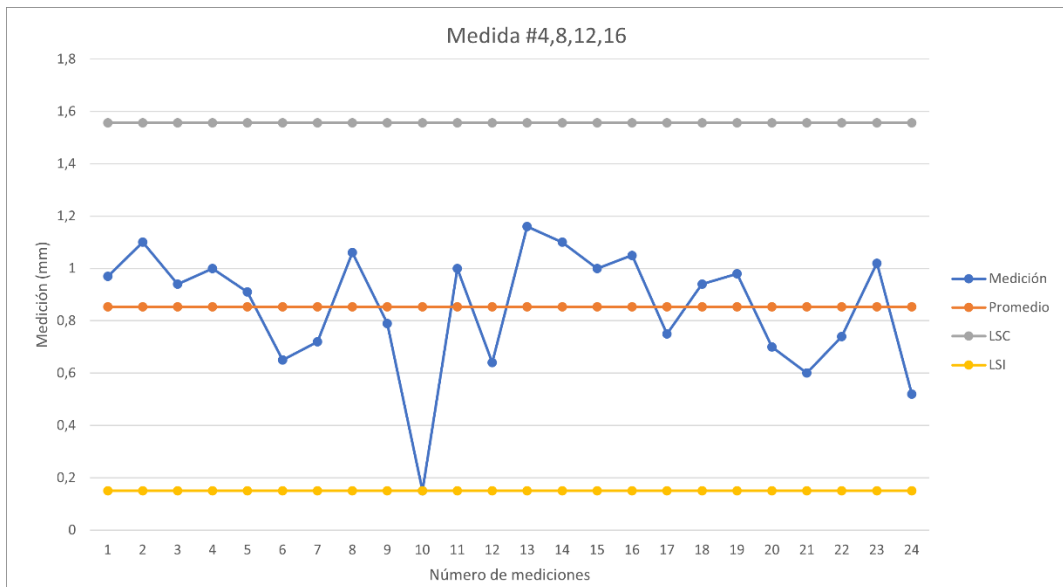


Figura 55 Carta control medida 4,8,12,16 producto original

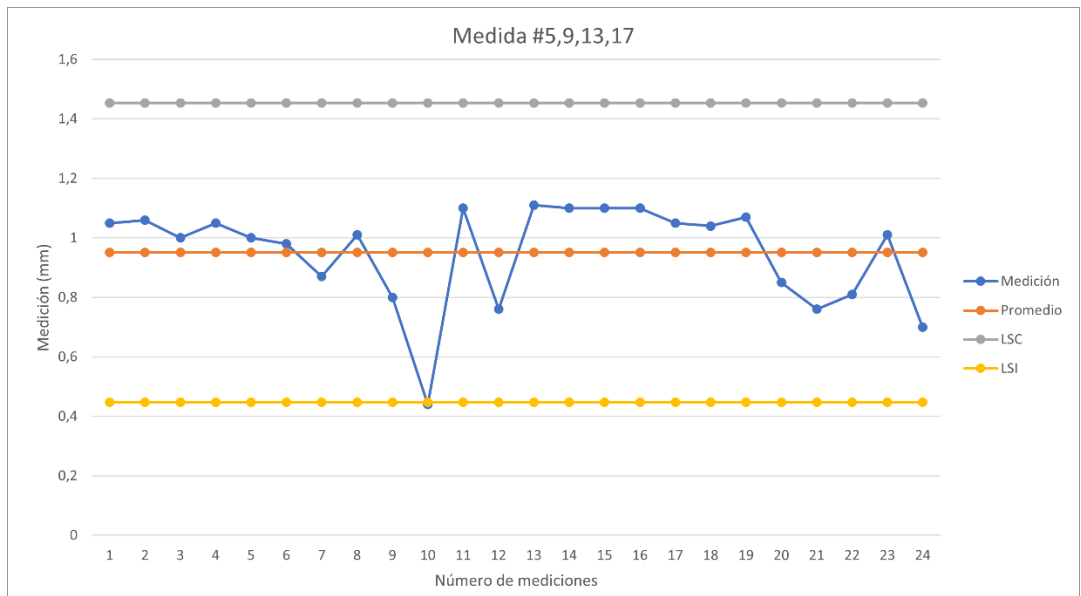


Figura 56 Carta control medida 5,9,13,17 producto original

Mediciones espesores producto termoformado escalado

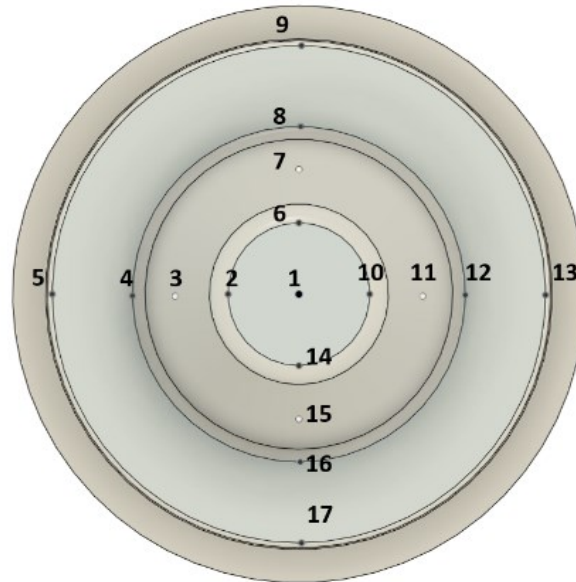


Figura 57 Medición producto escalado

Mediciones	V2 - 1	V2 - 2	V2 - 3	V2 - 4	V2 - 5	V2 - 6	Promedio
1	0,22	0,52	0,41	0,49	0,42	0,47	0,42
2	0,23	0,54	0,37	0,5	0,42	0,43	0,42
3	0,12	0,45	0,12	0,42	0,28	0,27	0,28
4	0,52	0,5	0,18	0,47	0,47	0,26	0,40
5	0,52	0,5	0,31	0,47	0,49	0,28	0,43
6	0,24	0,5	0,32	0,5	0,41	0,42	0,40
7	0,17	0,4	0,14	0,42	0,28	0,11	0,25
8	0,6	0,48	0,26	0,5	0,36	0,14	0,39
9	0,6	0,48	0,27	0,5	0,41	0,07	0,39
10	0,23	0,5	0,45	0,47	0,37	0,46	0,41
11	0,1	0,31	0,3	0,36	0,27	0,27	0,27
12	0,22	0,38	0,26	0,49	0,37	0,4	0,35
13	0,22	0,38	0,29	0,49	0,39	0,43	0,37
14	0,23	0,5	0,47	0,46	0,39	0,44	0,42
15	0,11	0,4	0,47	0,31	0,32	0,3	0,32
16	0,43	0,49	0,44	0,47	0,31	0,38	0,42
17	0,43	0,49	0,5	0,47	0,34	0,43	0,44
Promedio	0,305	0,460	0,327	0,458	0,371	0,327	0,375
Desv Est	0,172	0,063	0,118	0,053	0,065	0,128	0,060

Tabla 5 Medición espesores producto escalado

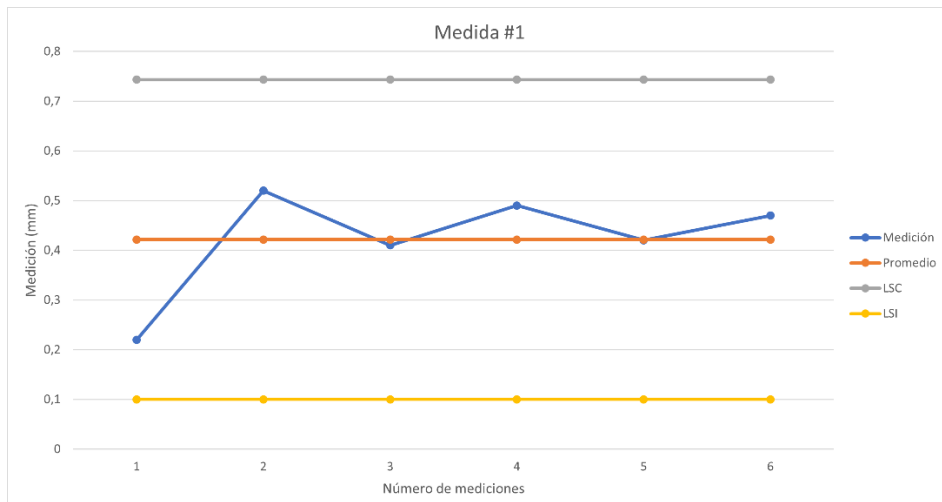


Figura 58 Carta control medida 1 producto escalado

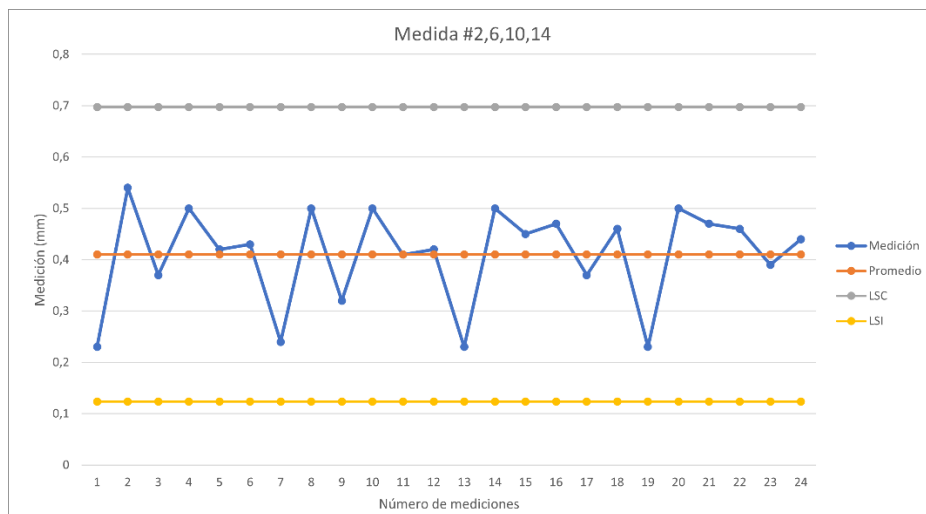


Figura 59 Carta control medida 2,6,10,14 producto escalado

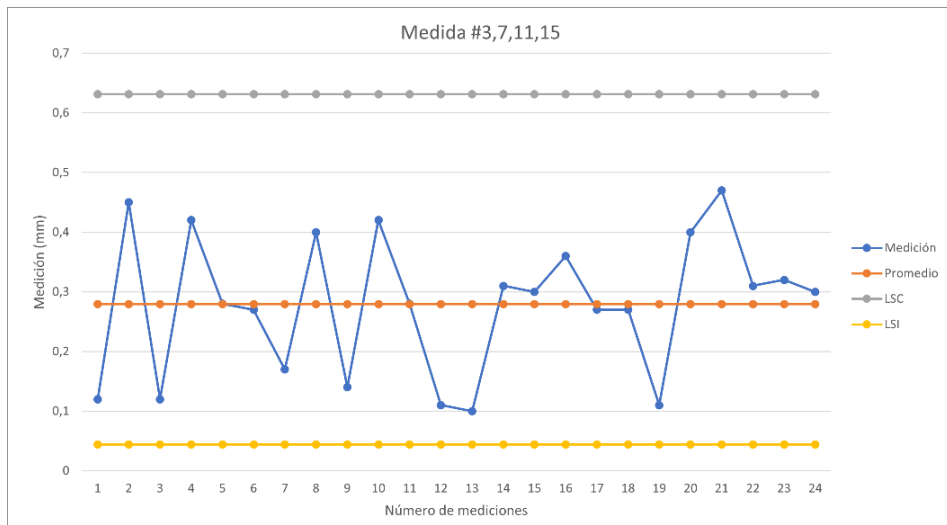


Figura 60 Carta control medida 3,7,11,15 producto escalado

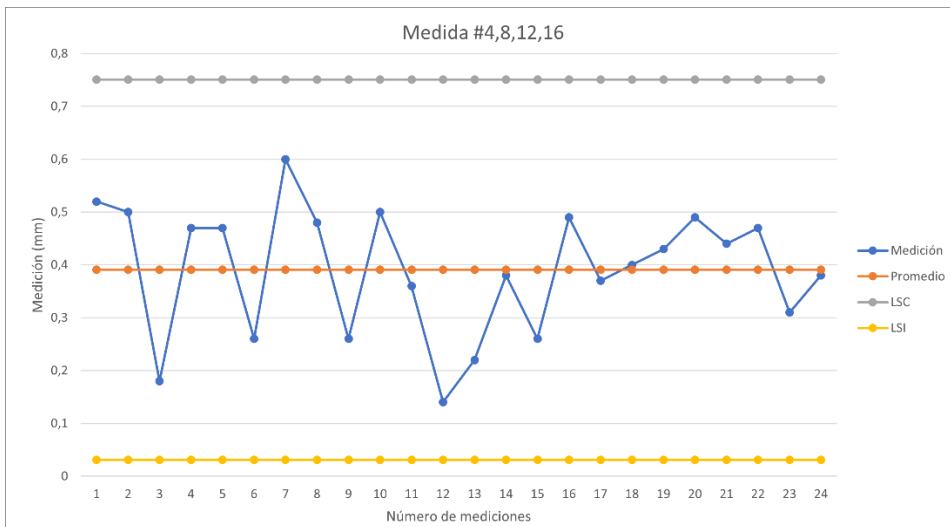


Figura 61 Carta control medida 4,8,12,16 producto escalado

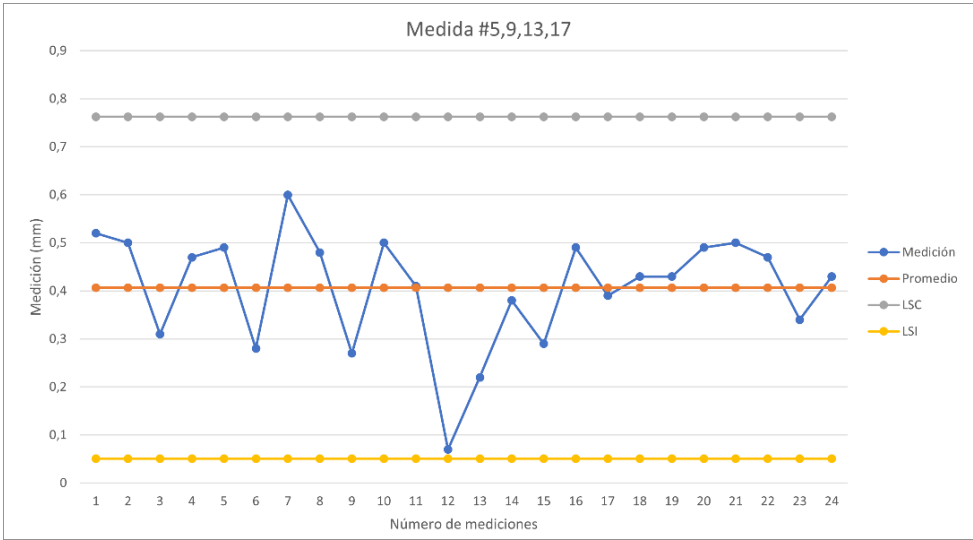


Figura 62 Carta control medida 5,9,13,17 producto escalado

Revisión datos obtenidos

Los promedios de espesores obtenidos son acordes al escalamiento realizado (0.6mm - modelo 1:1 y 0.3mm - escalado). Sin embargo, revisando las variaciones estándar de las mediciones, la distribución de espesores en el modelo a escala fue mejor (0.06 mm – escalado vs 0.3mm – modelo 1:1). Dos posibles razones pueden explicar esta diferencia:

El pre-estiramiento de la lámina por el calor del horno estuvo mejor distribuido en la lámina de menor calibre. Para llegar a la temperatura de procesamiento el tiempo es menor y al tener un menor peso, la lámina más delgada forma una catenaria menos profunda. Esto incide en la distribución final de espesores porque no se estira en exceso en el momento del moldeo.

El nivel de vacío aplicado para ambos modelos fue el mismo (aspiradora con 1 sola velocidad). En la lámina de menor calibre este flujo de aire tendrá menor resistencia para cumplir su función, disminuyendo el tiempo de formado e inhibiendo estiramientos excesivos.

Revisión en las medidas 3 7 11 y 15: estas medidas representan la zona de mayor estiramiento de la lámina. En el modelo 1:1 vemos que las medidas 3 y 15 son mayores que las medidas 7 y 11. Este puede corresponder a las diferencias en temperatura de molde mencionadas anteriormente. Esta tendencia también se aprecia en el modelo escalado.

Revisión en la medida 1: El promedio de la medida 1 entre modelo 1:1 y modelo escalado es igual (0.42mm). Este fenómeno se debe a el pre-estiramiento de la lámina cuándo se calienta. La catenaria formada por la lámina más pesada es mayor, por lo tanto, su estiramiento será mayor. Este punto es importante para la revisión final de resultados, pues las zonas con mayor influencia de este fenómeno pueden tener problemas de predicción. Lo que se puede hacer en este caso, es

concertar mayor calor en el centro de la lámina a termoformar en el modelo a escala, para obtener un estiramiento similar.

Distribución promedio de espesores

De cada carta de control tomamos los promedios, que están a la misma altura de producto y modelamos las partes con las distribución de espesores obtenida.

En general la variación en ciertas zonas se debe al poco control que tenemos de la temperatura de la lámina. La idea a futuro es tener un equipo que permita un mayor control en tiempo e intensidad.

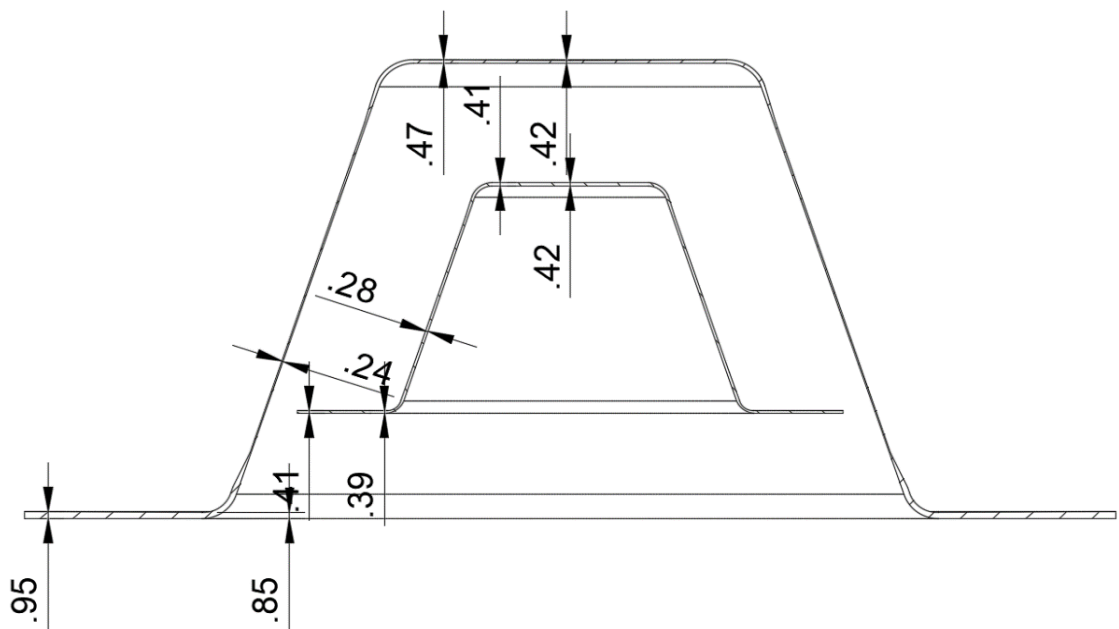


Figura 63 Comparativo medidas producto original y escalado

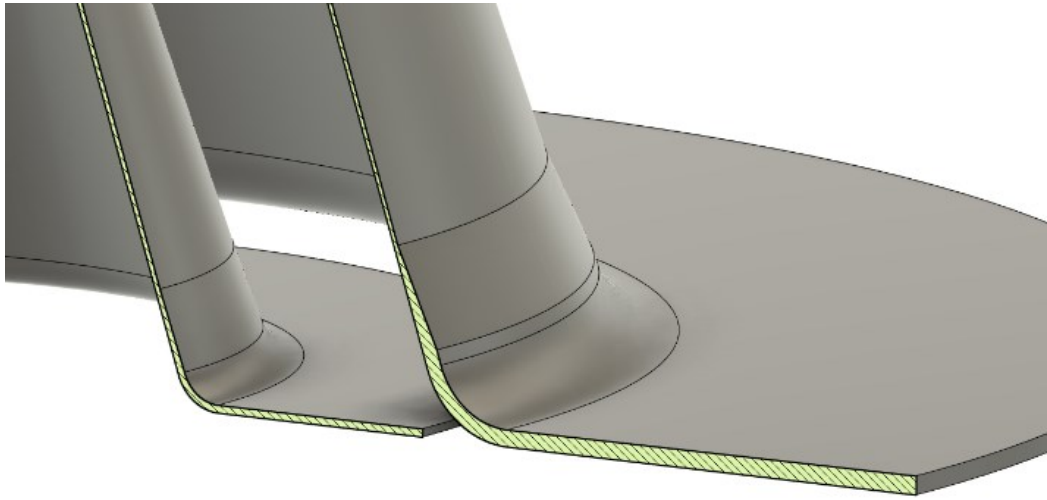


Figura 64 Comparativo esquinas inferiores

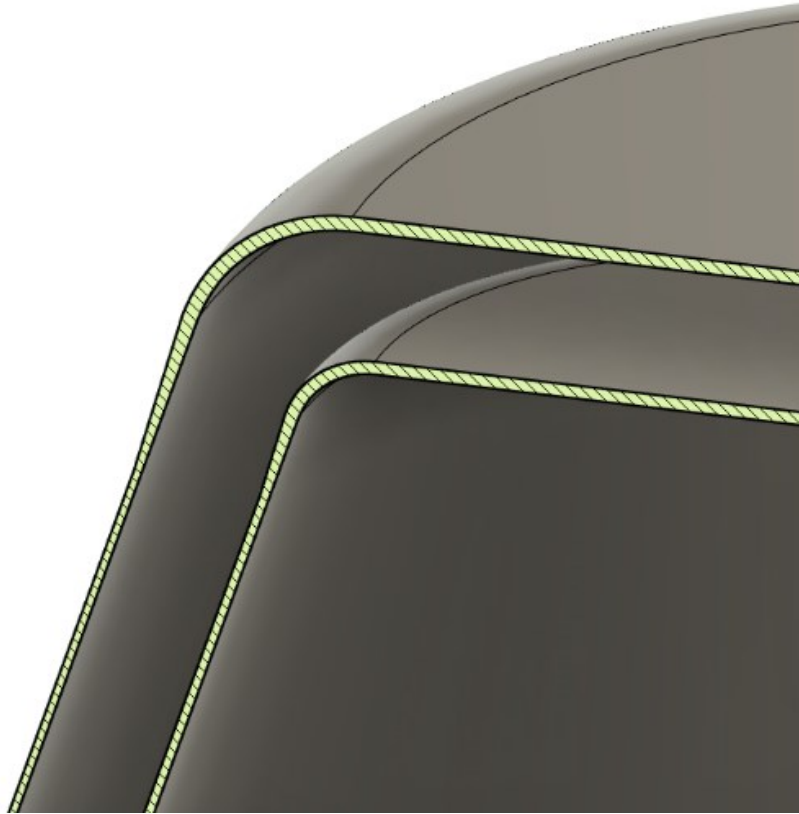


Figura 65 Comparativo esquinas superiores

NIVEL DE MADUREZ TECNOLÓGICA

De acuerdo con el desarrollo realizado, procedemos a identificar el grado de madurez de la solución planteada al problema inicial.

Esta calificación permitirá determinar las posibilidades que tendría a futuro la implementación de esta solución.

De acuerdo con el documento: “Guía para la identificación del grado de madurez (TRL)” del Centro de Desarrollo e Innovación Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia. (Gerson Miguel Bedoya, 2021) en cada nivel se debe responder con sí o no:

NIVEL 1: INVESTIGACIÓN BÁSICA

¿La investigación básica está culminada? (Gerson Miguel Bedoya, 2021)

Si

¿Cuenta con artículos científicos publicados? (Gerson Miguel Bedoya, 2021)

Si

NIVEL 2: CONCEPTO TECNOLÓGICO

¿Se han desarrollado estudios analíticos para los principios de la tecnología? (Gerson Miguel Bedoya, 2021)

Si

¿Se han iniciado investigaciones aplicadas y prácticas? (Gerson Miguel Bedoya, 2021)

Si

¿Se ha identificado una solución de diseño teórica? (Gerson Miguel Bedoya, 2021)

Si

¿El concepto de la tecnología ha sido formulado? (Gerson Miguel Bedoya, 2021)

Si

¿Se han explorado posibles usuarios del desarrollo? (Gerson Miguel Bedoya, 2021)

Si

¿Cuenta con un grupo de investigación que facilite las pruebas de la tecnología?
(Gerson Miguel Bedoya, 2021)

No

NIVEL 3: PRUEBA DE CONCEPTO

¿Están identificados los componentes de su tecnología? (Gerson Miguel Bedoya, 2021)

Si

¿Ha llevado a cabo algún estudio de mercado de su tecnología? (Gerson Miguel Bedoya, 2021)

No

¿Han iniciado las pruebas preliminares de los componentes y se ha verificado la viabilidad técnica en un laboratorio? (Gerson Miguel Bedoya, 2021)

Si

¿Ha realizado un estudio sobre los aspectos regulatorios? (Gerson Miguel Bedoya, 2021)

No

NIVEL 4: DESARROLLO Y VALIDACIÓN A NIVEL DE LABORATORIO

¿Ha ensamblado los componentes principales de la tecnología? (Gerson Miguel Bedoya, 2021)

Si

¿Ha realizado pruebas de validación en laboratorio? (Gerson Miguel Bedoya, 2021)

Si

¿Ha continuado la validación de mercado de su desarrollo? (Gerson Miguel Bedoya, 2021)

No

¿Tiene un prototipo (así sea incompleto) de su desarrollo? (Gerson Miguel Bedoya, 2021)

Si

¿Se han completado las pruebas iniciales de los componentes? (Gerson Miguel Bedoya, 2021)

Si

Los niveles siguientes: 5 al 9, no se califican, pues ningún punto en este proyecto ha llegado a cumplirse.

El nivel de madurez de este proyecto está alrededor de 3 (prueba de concepto), con algunos puntos cumplidos en 4 (desarrollo y validación a nivel de laboratorio).

Respecto a los puntos no alcanzados de madurez, las acciones a seguir son las siguientes:

Grupo de investigación: Buscar un grupo de investigación en procesamiento de polímeros (Industrial o Académico), con el interés en el desarrollo del equipo y contar con un entorno adecuado para el desarrollo y pruebas.

Validación de mercado y aspectos regulatorios: Con un grupo de investigación o empresa interesada se pueden hacer validaciones de mercado para el producto, demostrando su utilidad con el modelo funcional y productos de prueba.

Posteriormente se podrá analizar cuáles normas pueden aplicar para el desarrollo y certificación del equipo (RETIE, ICONTEC - ISO).

El siguiente paso para aumentar el nivel de madurez tecnológico de la solución, es la fabricación del equipo diseñado y la ejecución de pruebas con productos de la industria que requieran este tipo de análisis. Se pueden encontrar dichos productos en el sector automotriz o de electrodomésticos y la financiación para la fabricación del equipo puede realizarse entre empresa privada y academia.

CONSIDERACIONES ADICIONALES DESARROLLO DEL EQUIPO (8D, 9D Y 10D BIM)

Según el documento: “Understanding the Different Dimensions of BIM: A Guide to 8D, 9D, and 10D BIM” (The BIM Engineers, 2023), las dimensiones 8D, 9D y 10D pueden tener varias interpretaciones. Para el caso de un equipo diseñado y fabricado las consideraremos así:

8D: Aseguramiento de calidad en el diseño:

El equipo debe contar con los componentes necesarios para asegurar su correcta manufactura, eficiencia y confiabilidad. Se estandarizarán los componentes que se puedan y dejará información clara sobre los componentes especiales (planos de fabricación).

9D: Gestión de proyecto

En caso de que el proyecto sea financiado, se debe ejecutar la gestión de recursos del proyecto de forma eficiente. El objetivo es no incurrir en gastos innecesarios y tomar todas las decisiones de diseño importantes con los prototipos funcionales.

10D: Gestión de ciclo de vida del producto

El producto, en caso de que sea escalable a nivel comercial, se debe actualizar constantemente y en un futuro ejecutar el desarrollo de nuevas versiones con la retroalimentación de los clientes que lo usen.

CONCLUSIONES

Según los resultados de las mediciones de espesores entre producto original y producto escalado, se puede inferir la distribución de espesores finales.

Identificamos las zonas con mayor concentración de material y las zonas que posiblemente queden con alguna debilidad después del proceso de termoformado.

Encontramos varios retos y puntos a corregir que se mencionan en el análisis de datos y estos en resumen son:

Descartar dato de estiramiento máximo (centro de la lámina), por la diferencia en pesos que afectarán inevitablemente el pre-estiramiento distinto en ambos modelos.

Si no se puede descartar, utilizar un pisador para esta zona para “igualar” las condiciones de pre-estiramiento en láminas de distinto calibre.

De igual forma, si se cuenta con zonas de temperatura distintas en el equipo, se puede disminuir la potencia en la resistencia central de la lámina más gruesa.

Ajustar parámetros de temperatura y vacío entre modelos para mejorar la predicción

Realizar los ensayos en ambientes controlados o buscar la forma de usar pantallas o barreras para disminuir el enfriamiento por corrientes de aire.

El ajuste fino del proceso se puede realizar por medio del control de temperatura de la lámina, flujo de vacío y tiempos de calentamiento. En un equipo que nos permita tener mayor control, podemos replicar mejor el comportamiento del producto tanto en su versión original, cómo en su versión escalada.

Los moldes por manufactura aditiva son viables para este tipo de aplicaciones, sin embargo, para un proceso que requiera mayores volúmenes de producción, se deben considerar resinas de alta resistencia a la temperatura.

Una etapa posterior que se puede evaluar sería implementar refrigeración en moldes, para simular a escala el comportamiento térmico de este. El inconveniente sería el costo de manufactura aditiva en metal, para simular las condiciones más parecidas a los moldes de producción, que son generalmente fabricados en aluminio.

Con los resultados obtenidos, se da por viable la fabricación de la máquina para escritorio, sin embargo, se debe centrar su diseño en el control de variables de proceso (temperaturas, tiempos y caudales) para tener una mayor confianza en los resultados.

En general, los espesores se comportaron en ambos modelos de forma similar, sin embargo, como trabajo a futuro, se pueden hacer comparativos con geometrías más complejas para validar este modelo experimental.

Otra etapa a futuro de este modelo es validar con partes más grandes. En este trabajo lo hicimos con una escala del 1:2, sin embargo, para partes que se utilicen en el sector automotriz como los bumpers, podemos estar en escalas de 1:4 o 1.6.

La máquina diseñada para escritorio, tiene como objetivo ser un instrumento de las áreas de desarrollo de producto para predecir los espesores finales de piezas de termoformado que requieran grandes inversiones, como las usadas en el sector automotriz o de electrodomésticos.

El termoformado como proceso sigue siendo una opción viable cuando los volúmenes de producción no justifican la inversión en moldes de inyección. Sin embargo, debido a la gran cantidad de post procesos y desperdicio que puede traer, es necesario predecir desde la etapa de diseño el comportamiento final de la pieza. Las simulaciones en termoformado no son tan accesibles como las de inyección y la caracterización de los materiales para dichas simulaciones tiene unos costos muy

elevados. Es por esta razón que la opción de probar a escala puede ser atractiva para un departamento de desarrollo de productos o de moldes en la industria del termoformado.

REFERENCIAS

- Belofsky, H. (1995). *Plastics: Product Design and Process Engineering*. Munich Vienna New York: Hanser Gardner Publications.
- Campo, E. A. (2006). *The complete part design handbook*. Munich: Hanser Gardner Publications.
- Ertugrul Selcuk Erdogan, O. E. (2014). Prediction of Wall Thickness Distribution in Simple Thermoforming Moulds. *Journal of Mechanical Engineering*.
- Gerson Miguel Bedoya, L. C. (15 de 10 de 2021). *Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia* . Obtenido de Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia : https://minas.medellin.unal.edu.co/cdi/images/Procedimientos/MCDIIFMiGU001_Guia_para_la_identificacion_del_grado_de_madurez_TRL.pdf
- Lucía Rodríguez - Parada, P. F. (2019). Industrial product design: study of FDM technology for the manufacture of thermoformed prototypes. *Procedia Manufacturing*.
- Mohammad Ghobadnam, P. M. (2014). Numerical and experimental analysis of HIPS sheets in thermoforming process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- Osswald, B. B. (2006). *International Plastics Handbook*. Munich: Hanser Gardner Publications.
- Peter Schwarzmann, A. I. (2001). *Thermoforming A Practical Guide*. Munich: Hanser Publishers.
- Sencer Süreyya Karabeyoglu, O. E. (2017). AN EXPERIMENTAL STUDY ON WALL THICKNESS DISTRIBUTION IN THERMOFORMING. *Advances in Science and Technology Research Journal*.

The BIM Engineers. (03 de 03 de 2023). *The BIM Engineers Understanding the Different Dimensions of BIM: A Guide to 8D, 9D, and 10D BIM*. Obtenido de The BIM Engineers: Understanding the Different Dimensions of BIM: A Guide to 8D, 9D, and 10D BIM

Throne, J. L. (1996). *Technology of Thermoforming*. Munich Vienna New York: Hanser Publishers.

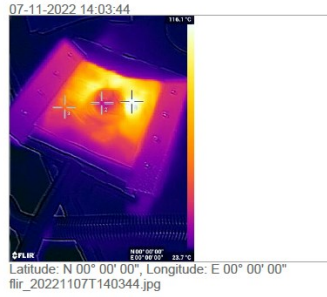
Throne, J. L. (2008). *Understanding Thermoforming*. Munich: Hanser Gardner Publications.

ANEXOS

TERMOGRAFÍAS

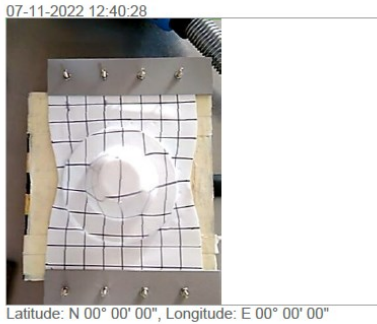
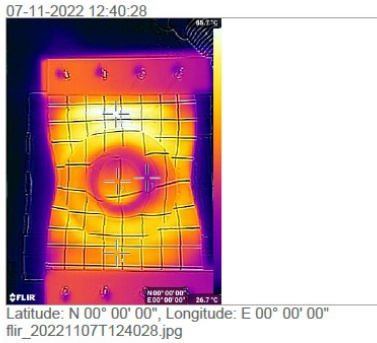
Measurements (°C)	
Spot 1	127.3
Spot 2	43.3
Spot 3	64.9

Parameters	
Emissivity	0.90
Refl. temp.	25.00 °C
Distance	1.00 m
Relative humidity	50.00 %
Atmospheric temp.	20.00 °C
Transmission	0.94
IR window temp	26.28 °C
IR window trans.	0.83
Latitude	N 00° 00' 00"
Longitude	E 00° 00' 00"



Measurements (°C)	
Spot 1	47.5
Spot 2	64.1
Spot 3	85.8
Spot 4	67.4

Parameters	
Emissivity	0.90
Refl. temp.	25.00 °C
Distance	1.00 m
Relative humidity	50.00 %
Atmospheric temp.	20.00 °C
Transmission	0.94
IR window temp	27.82 °C
IR window trans.	0.83
Latitude	N 00° 00' 00"
Longitude	E 00° 00' 00"



Measurements (°C)

Spot 1	41.9
Spot 2	79.2
Spot 3	111.8
Spot 4	100.4
Spot 5	100.6
Spot 6	107.6
Spot 7	70.5

Parameters

Emissivity	0.90
Refl. temp.	25.00 °C
Distance	1.00 m
Relative humidity	50.00 %
Atmospheric temp.	20.00 °C
Transmission	0.94
IR window temp	33.96 °C
IR window trans.	0.83
Latitude	N 00° 00' 00"
Longitude	E 00° 00' 00"

06-11-2022 17:34:13



Latitude: N 00° 00' 00", Longitude: E 00° 00' 00"
flir_20221106T173413.jpg

06-11-2022 17:34:13



Latitude: N 00° 00' 00", Longitude: E 00° 00' 00"

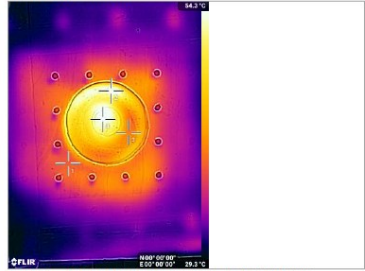
Measurements (°C)

Spot 1	39.4
Spot 2	54.1
Spot 3	41.1
Spot 4	54.7

Parameters

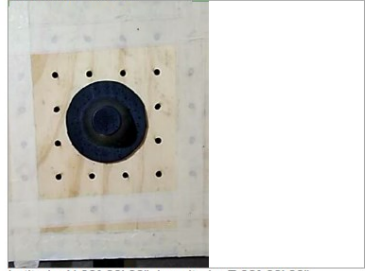
Emissivity	0.90
Refl. temp.	25.00 °C
Distance	1.00 m
Relative humidity	50.00 %
Atmospheric temp.	20.00 °C
Transmission	0.94
IR window temp	25.41 °C
IR window trans.	0.83
Latitude	N 00° 00' 00"
Longitude	E 00° 00' 00"

06-11-2022 16:58:26



Latitude: N 00° 00' 00", Longitude: E 00° 00' 00"
flir_20221106T165826.jpg

06-11-2022 16:58:26



Latitude: N 00° 00' 00", Longitude: E 00° 00' 00"

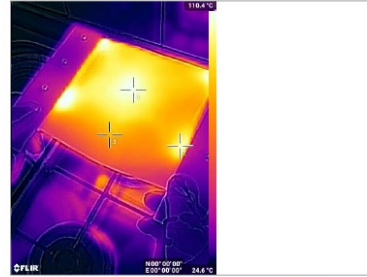
Measurements (°C)

Spot 1		108.3
Spot 2		106.3
Spot 3		87.9

Parameters

Emissivity	0.90
Refl. temp.	25.00 °C
Distance	1.00 m
Relative humidity	50.00 %
Atmospheric temp.	20.00 °C
Transmission	0.94
IR window temp	24.21 °C
IR window trans.	0.83
Latitude	N 00° 00' 00"
Longitude	E 00° 00' 00"

07-11-2022 14:03:00



Latitude: N 00° 00' 00", Longitude: E 00° 00' 00"
flir_20221107T140300.jpg

07-11-2022 14:03:00



Latitude: N 00° 00' 00", Longitude: E 00° 00' 00"

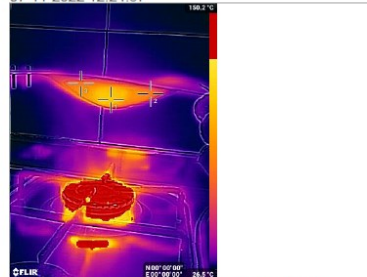
Measurements (°C)

Spot 1		150.2
Spot 2		111.7
Spot 3		114.5

Parameters

Emissivity	0.90
Refl. temp.	25.00 °C
Distance	1.00 m
Relative humidity	50.00 %
Atmospheric temp.	20.00 °C
Transmission	0.94
IR window temp	31.99 °C
IR window trans.	0.83
Latitude	N 00° 00' 00"
Longitude	E 00° 00' 00"

07-11-2022 12:24:57



Latitude: N 00° 00' 00", Longitude: E 00° 00' 00"
flir_20221107T122457.jpg

07-11-2022 12:24:57



Latitude: N 00° 00' 00", Longitude: E 00° 00' 00"

Measurements (°C)

Spot 1	69.2
Spot 2	150.2
Spot 3	85.2
Spot 4	89.7

Parameters

Emissivity	0.90
Refl. temp.	25.00 °C
Distance	1.00 m
Relative humidity	50.00 %
Atmospheric temp.	20.00 °C
Transmission	0.94
IR window temp	28.44 °C
IR window trans.	0.83
Latitude	N 00° 00' 00"
Longitude	E 00° 00' 00"

07-11-2022 12:18:16



Latitude: N 00° 00' 00", Longitude: E 00° 00' 00"
flir_20221107T121816.jpg

07-11-2022 12:18:16



Latitude: N 00° 00' 00", Longitude: E 00° 00' 00"

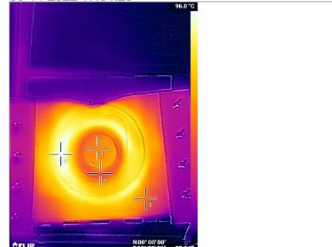
Measurements (°C)

Spot 1	70.1
Spot 2	96.6
Spot 3	66.9
Spot 4	62.4

Parameters

Emissivity	0.90
Refl. temp.	25.00 °C
Distance	1.00 m
Relative humidity	50.00 %
Atmospheric temp.	20.00 °C
Transmission	0.94
IR window temp	34.02 °C
IR window trans.	0.83
Latitude	N 00° 00' 00"
Longitude	E 00° 00' 00"

06-11-2022 17:34:25



Latitude: N 00° 00' 00", Longitude: E 00° 00' 00"
flir_20221106T173425.jpg

06-11-2022 17:34:25



Latitude: N 00° 00' 00", Longitude: E 00° 00' 00"