

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Diseño y manufactura de un sistema de molde y  
calentamiento para una compactadora de plástico para el  
Centro Educativo Técnico Chixot**

Trabajo de graduación presentado por Juan Diego Girón Córdón para  
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica  
Industrial

Guatemala  
2022







UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Diseño y manufactura de un sistema de molde y calentamiento para una compactadora de plástico para el Centro Educativo Técnico Chixot**

Trabajo de graduación presentado por Juan Diego Girón Córdón para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica Industrial

Guatemala  
2022



Vo.Bo.:

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Andrés Rodrigo Viau Najarro

Tribunal Examinador:

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Andrés Rodrigo Viau Najarro

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Laura María Roldan Reyes

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. José Antonio Bagur Nájera

Fecha de aprobación: Guatemala, 05 de enero de 2022.



<b>Lista de figuras</b>	VIII
<b>Lista de cuadros</b>	IX
<b>Resumen</b>	XI
<b>Abstract</b>	XIII
<b>I. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>II. Justificación</b>	<b>3</b>
<b>III. Objetivos</b>	<b>5</b>
A. Objetivo general . . . . .	5
B. Objetivos específicos . . . . .	5
<b>IV. Marco teórico</b>	<b>7</b>
A. Moldeo por compresión . . . . .	7
B. Consideraciones para el diseño de un producto para el proceso de moldeo en general . . . . .	8
C. Tipo de moldes para moldeo de plástico . . . . .	9
D. Factores a considerar para el moldeo por compresión . . . . .	10
E. Consideraciones de diseño del molde de compresión . . . . .	11
F. Sistemas de extracción . . . . .	12
G. Calor eléctrico . . . . .	12
H. Transferencia de calor mediante resistencias eléctricas . . . . .	13
<b>V. Metodología</b>	<b>15</b>
A. Descripción de metodología . . . . .	15
B. Identificación de necesidades . . . . .	16
C. Definición de requisitos . . . . .	17
D. Diseño preliminar . . . . .	18
E. Diseño final . . . . .	22

1. Molde y resistencias . . . . .	22
2. Base . . . . .	23
3. Pieza compresora . . . . .	25
F. Cálculos . . . . .	25
1. Configuración de simulaciones en ANSYS . . . . .	29
G. Proceso de manufactura . . . . .	34
1. Manufactura de la base . . . . .	34
2. Manufactura de la pieza compresora . . . . .	36
3. Manufactura del molde . . . . .	37
H. Pruebas . . . . .	42
<b>VI. Resultados</b>	<b>43</b>
1. Resultados de simulación térmica transitoria . . . . .	44
2. Resultados de simulación estructural estática . . . . .	48
<b>VII. Discusión de resultados</b>	<b>51</b>
<b>VIII. Conclusiones</b>	<b>55</b>
<b>IX. Recomendaciones</b>	<b>57</b>
<b>X. Bibliografía</b>	<b>59</b>
<b>XI. Anexos</b>	<b>61</b>
A. Planos de construcción . . . . .	61
B. Protocolo de pruebas . . . . .	62

---

## Lista de figuras

---

1. Propuestas de ecoladrillo, vista frontal . . . . .	18
2. Propuestas de ecoladrillo, vista superior . . . . .	18
3. Isométrico del molde, diseño 1 . . . . .	20
4. Plano del molde, diseño 1 . . . . .	20
5. Isométrico del molde, diseño 2 . . . . .	21
6. Plano del molde, diseño 3 . . . . .	22
7. Isométrico del molde, diseño final . . . . .	23
8. Plano del molde y sistema de calentamiento, diseño final . . . . .	24
9. Plano del molde y sistema de calentamiento, diseño final . . . . .	24
10. Pieza compresora, diseño final . . . . .	25
11. Materiales . . . . .	29
12. Generación de superficies . . . . .	30
13. Asignación de material . . . . .	31
14. Contacto <i>bonded</i> . . . . .	31
15. Contacto <i>no separation</i> . . . . .	32
16. Mallado . . . . .	32
17. <i>Heat flow</i> . . . . .	33
18. Convección . . . . .	33
19. Fuerza ejercida . . . . .	34
20. Soporte <i>fixed</i> . . . . .	34
21. Barras de aluminio 6061 . . . . .	35
22. Sujetador lateral "L" . . . . .	35
23. Fresado de piezas de aluminio . . . . .	36
24. Base ensamblada con guía para el molde . . . . .	36
25. Manufactura de pieza compresora . . . . .	37
26. Pieza compresora . . . . .	37
27. Tubo de acero A36 . . . . .	37
28. Torneado del molde . . . . .	38
29. Ajuste entre la base y el molde posterior al torneado . . . . .	38
30. Comparación entre molde oxidado y molde torneado . . . . .	39
31. Ensayo de resistencias en el molde . . . . .	39
32. Rectificado de cavidades . . . . .	40
33. Bisagras del molde . . . . .	40

34. Sujetadores del molde a la base . . . . .	41
35. Pestañas de cierre del molde . . . . .	41
36. Sistema de molde y calentamiento . . . . .	43
37. Simulación 1: Tiempo de calentamiento . . . . .	44
38. Simulación 2: Tiempo de enfriamiento . . . . .	44
39. Simulación 3: Distribución de temperatura con 300 W . . . . .	45
40. Simulación 4: Distribución de temperatura con 250 W . . . . .	45
41. Simulación 5: Distribución de temperatura con 500 W . . . . .	46
42. Diagrama de cuerpo libre del molde . . . . .	48
43. Simulación 6: Factor de seguridad . . . . .	49
44. Simulación 6: Deformación total . . . . .	49
45. Factor de seguridad mínimo y máximo del molde . . . . .	50
46. Ecoladrillo formado a 180 °C . . . . .	53
47. Ecoladrillo formado a 250 °C . . . . .	53

---

Lista de cuadros

---

1. Ventajas y desventajas entre moldeo por compresión e inyección . . . . .	8
2. Requerimientos generales . . . . .	17
3. Requerimientos operacionales . . . . .	17
4. Limitantes . . . . .	17
5. Propiedades de materiales . . . . .	30
6. Variación de temperatura entre 300 W y 250 W . . . . .	46
7. Variación de tiempo entre 300 W y 250 W . . . . .	46
8. Variación de temperatura 300 W y 500 W . . . . .	47
9. Variación de tiempo entre 300 W y 500 W . . . . .	47
10. Tiempo necesario para alcanzar una temperatura de 180 °C . . . . .	47
11. Tiempo necesario para alcanzar una temperatura de 45 °C . . . . .	47
12. Variación de potencia en resistencias electricas . . . . .	52



El Centro Educativo Técnico Chixot cuenta con la problemática de la acumulación de residuos de botellas PET resultantes de proyectos de reciclaje para sus instalaciones. Utilizan las partes rectas de las botellas de plástico de 2L para la fabricación de tejas en las obras civiles del lugar. Se propuso utilizar dichos residuos como materia prima para la fabricación de ecoladrillos compactados por medio de presión y calor, para utilizarlos como material de construcción. Para lograr esto, se diseñó y manufacturó una máquina compactadora de plástico conformada por los siguientes módulos: sistema del molde y calentamiento, carcasa y estructura, sistema de compresión y sistema eléctrico.

El sistema de molde y calentamiento debía asegurar la forma final del ecoladrillo a partir del diseño de la cavidad en su interior y proporcionar el calor necesario para moldear el plástico sin fundirlo o quemarlo. Se realizó un diseño 3D con ayuda de un software y se realizó una simulación de elementos finitos de transferencia de calor transitoria para estimar el tiempo de calentamiento hasta alcanzar una temperatura límite de 180°C. Se debía asegurar el acople adecuado entre los componentes calefactores y el molde para garantizar una operación de calentamiento y compactación constante. Posteriormente se hicieron pruebas para determinar la funcionalidad del sistema y el moldeo correcto del plástico, aunque no se obtuvo una compresión completa debido a que se requiere mayor temperatura para unir todo el material, corriendo el riesgo de fundición.



The Chixot Technical Education Center is facing the problem of the accumulation of PET bottle waste resulting from the recycling projects for its facilities. They use the straight parts of the 2L bottles for the manufacturing of roof tiles in the civil works in their location. It was proposed to use such waste as raw material for the manufacturing of eco-bricks compacted by means of pressure and heat in order to use them as construction material. To achieving this, a plastic compacting machine was designed and manufactured consisting of the following modules: molding and heating system, casing and structure, compression system and electrical system.

The molding and heating system had to guarantee the final shape of the eco-brick from the design of the cavity inside it providing the necessary heat to mold the plastic without melting or burning it. A 3D design was carried out with the help of software and transient heat transfer finite element simulation was carried out to estimate heating time until reaching the limit temperature of 180 ° C. Proper coupling between the heating components and the mold had to be ensured to guarantee constant heating and compaction operation. Subsequently, tests were carried out to determine the functionality of the system and the correct molding of the plastic, although complete compression was not obtained because higher temperature is required to merge all the material with the risk of melting.



A continuación se muestra el diseño y la manufactura del sistema del molde y calentamiento de una máquina compactadora de PET para el Centro Educativo Técnico Chixot. El centro educativo realiza proyectos de reciclaje dentro de sus instalaciones para fomentar la cultura de reciclaje en la región, dando un segundo uso a materiales como plástico, caucho, vidrio y aluminio. Utilizan estos materiales reciclables para la construcción de sus instalaciones para brindar servicios educativos a menores de edad. Aunque, debido a sus limitaciones de equipo, todos los procesos de reciclaje se llevan a cabo de forma manual, los cuales consumen gran cantidad de tiempo y esfuerzo físico. Además, no han conseguido reciclar todos los residuos que presentan en sus instalaciones, especialmente los conos y los fondos de las botellas PET. Estos residuos surgen a partir del corte de la sección recta de las botellas para fabricar tejas para las edificaciones. Actualmente, se busca una solución para atacar ambos problemas, mejorar la eficiencia de reciclaje y aprovechar los residuos de botellas PET para reducir la contaminación.

Hoy en día, existen algunos métodos para reciclar residuos plásticos, ya sea dándoles un segundo uso, añadirlos como refuerzo en mezclas de concreto o asfalto o preprocesarlos para manufacturar nuevos productos. Como es el caso de las embotelladoras, que utilizan cierto porcentaje de producto reciclado para mezclarlo con plástico virgen para elaborar nuevas botellas, y así ayudar a mitigar el impacto de contaminación de residuos sólidos. Uno de los métodos más utilizado es la compactación de plástico, en donde se emplea el moldeo de material por compresión y calor para fabricar un producto cuya geometría proviene de un molde.

La compactación de plástico es un método más sencillo que su competidor, la inyección de plástico. Ya que no requiere de maquinaria compleja ni subsistemas de tratamiento de plástico, como el pistón de inyección, canales de inyección o canales de enfriamiento. La compactación únicamente requiere un molde de la forma final del producto a fabricar, presión de compactación y calor para moldear el plástico. El calor necesario generalmente es proporcionado por resistencias eléctricas que se encuentran sujetas en el molde y son controladas mediante un sistema eléctrico para mantener una temperatura límite. Es por ello que

se buscó diseñar y manufacturar un sistema de molde y calentamiento para implementar el moldeo de plástico por compresión utilizando los residuos de plástico en el Centro Educativo Técnico Chixot y dar un uso útil al producto final

---

### Justificación

---

El Centro Educativo Técnico Chixot se caracteriza por realizar proyectos sostenibles a partir de desechos reciclados. El proyecto principal consta de ecoladrillos para construir muros utilizando botellas PET completas, rellenándolas con otros residuos sólidos para fortalecer su estructura. Además, utilizan la parte central de botellas de plástico PET para la fabricación de techos para sus salones. Debido a que no se utilizan las botellas completas, este proceso resulta en una acumulación de desechos de partes superiores e inferiores de las botellas PET. Las personas encargadas del centro educativo piensan que dichos residuos podrían ser utilizados para llevar a cabo más proyectos sostenibles. El proceso de fabricación de estos ecoladrillos es de forma manual, por lo que producir una gran cantidad de ecoladrillos consume mucho tiempo del personal.

Por lo tanto, el diseño y manufactura de una unidad de reciclaje para producir ladrillos de plástico compactado, representa una oportunidad para el aprovechamiento de los desperdicios de las botellas PET y reducir el tiempo de fabricación de estos en comparación al proceso actual. De esta manera se le puede brindar un segundo uso a los residuos de botellas PET que generen un valor para la construcción de infraestructura local.

La unidad de reciclaje consta de una máquina compactadora de residuos de botellas PET conformada por cuatro módulos individuales: carcasa y estructura, sistema de calentamiento y molde, sistema de compresión, y sistema eléctrico e ingeniería de sistemas.

El módulo del sistema de calentamiento y molde de la unidad de reciclaje cumple la tarea de asegurar el cierre y moldeo de residuos de botellas PET a su forma final con ayuda de calor por medio de resistencias eléctricas, ya que sin este último no sería posible la fabricación de ladrillos de plástico. Debe presentar un diseño capaz de soportar las temperaturas cercanas a la fusión del plástico y cumplir los requisitos fundamentales de los sistemas de moldeo para extraer el producto final de forma segura y eficiente, sin dañar al operario, molde o los residuos de botellas PET a compactar. Busca finalizar el proceso de moldeo de plástico con ayuda de calor.

En lo que atañe a el sistema de calentamiento a implementar, este debe brindar un flujo

de calor homogéneo en toda la superficie del molde para garantizar una adhesión fuerte, con ayuda de presión producida por un módulo de compactación, en el plástico a compactar. Por otro lado, con ayuda de este módulo, se puede determinar valores experimentales del sinterizado de PET que no son de fácil acceso, para que guíen futuras investigaciones u otros experimentos de aplicaciones similares dentro del campo de reciclaje de plásticos.

#### **A. Objetivo general**

Diseñar, analizar y manufacturar el sistema de calentamiento para la compactación de residuos de botellas PET, tomando en cuenta los componentes necesarios para acoplarlo al molde del producto.

#### **B. Objetivos específicos**

- Determinar las temperaturas de operación del sistema con base en las propiedades térmicas del PET.
- Seleccionar las resistencias eléctricas necesarias para llevar a cabo el calentamiento adecuado.
- Diseñar y ensamblar un sistema de calentamiento para moldear el plástico a su forma final.
- Diseñar y fabricar un molde adecuado utilizando materiales disponibles en el mercado local.



### A. Moldeo por compresión

El moldeo por compresión es una técnica empleada para polímeros termofijos y elastómeros, en cuanto a los termoplásticos, únicamente se utiliza para casos muy especiales, ya que no alcanza la eficiencia de un sistema de moldeo por inyección. El proceso consiste en cargar una cantidad precisa del material de moldeo, el cual se le denomina carga, en la cavidad inferior del molde calentado. Luego se juntan las mitades del molde para comprimir la carga, forzándola a adaptar la forma de la cavidad del molde. La carga se calienta a través del molde para curar y polimerizar el material en un producto sólido. Finalmente se abren las mitades del molde y se retira la pieza formada de la cavidad. La presentación de la carga inicial del material a moldear puede ser en polvo, pellets, líquida o preformada. La cantidad de material de la carga debe estar medida para obtener una consistencia en la producción de moldeo.

Comúnmente en la práctica, se acostumbra a precalentar la carga para reducir el tiempo de ciclo de producción. Para ello se utiliza calentadores infrarrojos, convención dentro de un horno o uso de un tornillo rotatorio en un barril caliente dependiendo de la presentación de la carga.

En cuanto al sistema de moldeo, las prensas para la compresión se orientan de forma vertical y cuentan con placas de sujeción para fijar las mitades del molde. El movimiento de las placas puede darse con el ascenso de mitad inferior del molde, fijando la placa superior (siendo la aplicación más común); o el descenso de la mitad superior, fijando la placa inferior.

Los moldes por compresión se pueden clasificar en tres: moldes manuales, empleados para hacer ensayos; semiautomáticos, que cuenta con un ciclo programado de prensado mientras que un operador carga y descarga el material de forma manual; y automáticos, operando un ciclo de producción completamente programado.

Los moldes utilizados para el moldeo por compresión suelen ser mucho mas simples que

los moldes utilizados en sistemas de inyección. El proceso en sí se limita a firmas sencillas en piezas, por lo que no cuenta con un sistema de bebedero y vaciadero, debido a las capacidades inferiores de flujo de los polímeros termoestables. Aunque, el molde debe contar con un sistema de calentamiento durante el proceso y requiere de un sistema de transferencia de calor, por lo general, se utilizan resistencias eléctricas, vapor calentado o aceite caliente para llevarlo a cabo. La ventaja de un molde de compresión sobre un molde de inyección recae en la sencillez del molde, el costo reducido que implica su manufactura y componentes adyacentes, y requiere menor mantenimiento. Pero está sujeto a duraciones de ciclos prolongados, por ende, el flujo de producción es considerablemente menor que un sistema de moldeo por inyección (Groover, 2007).

Cuadro 1: Ventajas y desventajas entre moldeo por compresión e inyección

Ventajas del moldeo por compresión respecto al moldeo por inyección	Desventajas del moldeo por compresión respecto al moldeo por inyección
Menor cantidad de mermas en el proceso debido a que no hay recortes de material.	Complejidad de la pieza a producir limitada.
Mejoramiento de propiedades mecánicas debido a que no se generan orientaciones elevadas.	Requiere mayor presión para llenar las cavidades debido a la viscosidad elevada del material a moldear.
Fabricación de piezas pesadas de más de 1.5 kg.	Cantidad a producir limitada, aumentando el tiempo de ciclo.
Moldes y maquinaria más económicos	Pueden generarse fugas en la línea de partición de los moldes si no se emplea un cierre adecuado.

(Beltrán Rico y col., 2012)

## B. Consideraciones para el diseño de un producto para el proceso de moldeo en general

- Resistencia y rigidez: debido a que los plásticos no son tan fuertes como los metales, no deben de utilizarse en aplicaciones que deban soportar esfuerzos altos, además, sus propiedades de resistencia varían considerablemente entre tipos de plásticos.
- Temperatura: a diferencia de los metales o cerámicos, los plásticos soportan temperaturas de servicio mucho más bajas, ya que cuentan con una temperatura de degradación (a temperaturas muy altas se quema en vez de fundirse).
- Expansión térmica: la expansión térmica es mayor en plásticos que en metales, por lo que los cambios dimensionales serán más significativos y notorios.
- Degradación: muchos plásticos sufren una degradación debido a la exposición constante de luz solar y otras formas de radiación, o ante una atmósfera de oxígeno y ozono. Además, algunos plásticos son solubles en solventes comunes. Aunque, son resistentes a la corrosión que afecta a los metales considerablemente.
- Complejidad de la pieza: las configuraciones geométricas dentro del molde definen el costo de su manufactura, puede ser más económico el diseño de un molde complejo si cuenta con componentes individuales que se ensamblen entre sí.

- Ahusado (forma cónica del molde): una pieza debe diseñarse con un ahusado en sus lados para facilitar la extracción del molde. Se recomienda un ahusado de  $1/2^\circ$  a  $1^\circ$  para termofijos, y de  $1/8^\circ$  a  $1/2^\circ$  para los termoplásticos.
- Espesor de pared: se trata de evitar las secciones transversales gruesas debido a que se desperdicia material y es probable que se cause pandeo por la contracción, demorándose en endurecer.
- Costillas de refuerzo: se obtiene mayor rigidez en piezas de plástico sin excederse en el espesor de la pared. Para minimizar las marcas de hundimiento en la pared exterior, las costillas deben ser más delgadas que las paredes de refuerzo.
- Radios de esquinas y biselés: se deben evitar esquinas agudas internas y externas, porque obstruyen el flujo de material, creando defectos superficiales y generan concentración de esfuerzos en la pieza final.
- Agujeros: complican el diseño del molde y la remoción de la pieza, al igual que los radios interrumpen el flujo de material.
- Tolerancias: determinan las variaciones dimensionales aceptables en la manufactura de una pieza (Groover, 2007).

## C. Tipo de moldes para moldeo de plástico

Un molde es una herramienta para llevar a cabo un proceso de moldeo, se conforma de una o varias piezas, que contiene una cavidad hueca con la forma del producto final a fabricar, la cual es llenada por un material plástico. En la industria, los moldes se clasifican según la colada usada y la expulsión de la pieza, y el desmoldeo en los procesos productivos, se detallan de la siguiente manera:

- Moldes de dos placas (estándar): el tipo más común de uso generalizado para el moldeo de plásticos, debido a la simplicidad de diseño y manufactura; además de la versatilidad en la fabricación de piezas plásticas. Se conforma de dos placas unidas entre sí por medio de un sistema mecánico.
- Molde de mordazas: se denomina así por el proceso de extracción de la pieza de plástico, donde se requieren correderas móviles accionadas por un sistema mecánico o hidráulico auxiliar.
- Molde de extracción por segmentos: se denomina por la extracción de la pieza por segmentos o etapas.
- Molde de placas o sándwich: moldes simples que se forman por la unión entre dos piezas, una fija y otra móvil.
- Molde de tres placas: similar al molde de dos placas, pero se añade una tercera placa en el centro que aísla la matriz de las piezas fijas y móviles. graduación.
- Molde de canal caliente: molde alimentado por medio de un canal de material a alta temperatura.

Por lo general, los moldes de estos tipos sufren tratamientos superficiales con el objetivo de aumentar sus propiedades de dureza o resistencia a la presión a recibir, al igual que reducir su desgaste y aumentar su resistencia a la corrosión. Entre estos tratamientos especiales se encuentran:

- Nitruración: proceso más común dentro de la industria, aumenta la durabilidad del molde.
- Cementación: mejora las propiedades transformando la superficie dejando intacto el núcleo, aunque solamente se aplica para moldes de acero.
- Cromado: recubrimiento de una capa de cromo que proporciona dureza, y se utiliza para matrices abrasivas.
- Niquelado: recubrimiento de capas de níquel, brindando un aumento de dureza y resistencia al ataque químico, pero hace al molde más frágil provocando que se rompa con facilidad (Sánchez & Torres, 2014).

#### D. Factores a considerar para el moldeo por compresión

- Temperatura del molde: la temperatura del molde dependerá del compuesto polimérico a moldear. Para plásticos termoestables, se emplea un rango de temperatura de 141-204°C [poner para termoplásticos]. Se recomienda consultar a los proveedores de materia prima para establecer temperaturas y proceso de moldeo recomendados para un material específico. Los moldes pueden ser calentados mediante vapor, aceite caliente, cartucho eléctrico, calentador de tira o cualquier combinación de los anteriores.
- Temperatura del material: es recomendable precalentar la mayoría de compuestos a moldear para reducir el tiempo de curado, el cual está en función del incremento de temperatura del molde y la temperatura máxima del compuesto cuando se carga dentro del molde (Drozda & Society of Manufacturing Engineers, 1996).
- Presión de moldeo: la presión en el molde es la división entre la fuerza ejercida por la prensa sobre la sección transversal de la cavidad. Las condiciones de moldeo se mejoran con un aumento en la fuerza de la prensa después de cerrar el molde completamente. Además, con mayor presión de moldeo se aumentará la calidad de la pieza y reducirá la temperatura necesaria de moldeo y curado de pieza. La presión ejercida provoca que el material se disperse a lo largo de las cavidades del molde y lo fuerza a llenarlas por completo. La presión requerida dependerá del método de moldeo a implementar.
- Cierre de molde: la velocidad del cierre del molde provocada por la prensa mantiene la carga dentro de la cavidad para que esta no sea expulsada a través de la línea de cierre entre las placas del molde. Se podrían generar piezas con baja densidad y características técnicas deficientes (Beltrán Rico y col., 2012).
- Tiempo de curado: tiempo que tarda la pieza en endurecerse por completo, el cual está en función del espesor de la pieza procesada. Generalmente, los materiales plásticos son malos conductores de calor, por lo tanto, a medida que aumenta el espesor de la pieza,

el tiempo de curado será más largo (Drozda & Society of Manufacturing Engineers, 1996).

- Factor de compresión: se denomina factor de compresión a la relación entre la densidad de la pieza final y la densidad de la carga inicial de moldeo del material plástico a procesar. Debido a que la masa del material a moldear permanece inalterada durante el proceso, el factor de compresión se simplifica a la relación de volúmenes entre la carga inicial y la pieza moldeada.

$$F.C. = \text{Volumen de carga} / \text{Volumen de pieza moldeada}$$

El factor de compresión es un parámetro que ayuda a determinar el estado inicial de la carga, si tiene un valor muy alto, se recomienda el uso de preformas para colocar la cantidad correcta de material en la cavidad, sin la necesidad de implementar un espacio suministro de carga. Si en caso contrario, el factor de compresión es bajo, la carga se puede introducir directamente dentro de la cavidad en forma de polvos, viruta o pellets (Beltrán Rico y col., 2012).

- Prensa de moldeo: El molde es insertado en una prensa de moldeo vertical, ya sea actuando hacia arriba o hacia abajo; generalmente impulsada mediante un sistema hidráulico. Algunas prensas cuentan con un sistema de inyección de material, usualmente en ambos sentidos de forma vertical. La operación de compresión puede ser tanto de forma automática o semi-automática, en magnitudes de hasta 2000 toneladas (Drozda & Society of Manufacturing Engineers, 1996).

## E. Consideraciones de diseño del molde de compresión

Existen ciertos factores que influyen en la construcción del molde, entre estos se incluyen la cavidad y fuerzas, y los materiales y métodos de manufactura.

- Cavidad y fuerzas: el molde puede ser de una única cavidad o multicavidades, el número de cavidades se determina a partir de los requisitos de producción, tamaño de la pieza, tipo de material y capacidad de cierre de la prensa de moldeo. Los factores que determinan el diseño de la cavidad del molde y la fuerza operacional incluye el material, el diseño de la pieza, dimensiones y tolerancias, restricciones de rebaba y requisitos de uso final.
- Placas retenedoras: las cavidades se ensamblan en placas montables, las cuales se ubican en un plato retenedor. Las fuentes de calor se encuentran en una o ambas unidades (Drozda & Society of Manufacturing Engineers, 1996).
- Clases de moldes de compresión: existen tres tipos básicos de moldeo por compresión:
  - Molde positivo: todo el material de la carga queda encerrado dentro de la cavidad del molde. La presión aplicada comprime la carga hasta su volumen más pequeño posible. Cualquier variación en el peso de la carga dará como resultado una variación en el espesor de la pieza.

- Molde de rebaba: cuenta con un área estrecha adicional alrededor de la cavidad. La carga se comprime en la cavidad a una densidad que se empareja a la fuerza aplicada. El exceso de material de la carga puede escapar a través del área adicional como rebaba, el cual puede ser removido antes de que cure sobre la superficie y se adhiera al molde.
- Molde semi-positivo: combina las mejores características del molde positivo y de rebaba. Su diseño incluye un pozo de material de mayor área dentro de la cavidad, de esta forma atrapa mayor cantidad de material de forma positiva, solamente expulsando los excesos mínimos de rebaba por el área estrecha adicional. El diseño de la rebaba puede ser de forma vertical o de forma horizontal (Rosato y col., 2004).

## F. Sistemas de extracción

El sistema de extracción de piezas de moldes tiene la función de expulsar la pieza final de la cavidad del molde, después de que esta haya adoptado la forma geométrica deseada sin afectar ninguna de las propiedades físicas ni dañar su integridad. La extracción se lleva a cabo en función de la fragilidad, tamaño y peso de la pieza, por lo que estos sistemas se diseñan según los siguientes parámetros: para tamaños grandes y piezas delicadas, la extracción es asistida mecánicamente o es recogida de forma manual. Para piezas pequeñas y ligeras, se emplea la gravedad para que la pieza tenga caída libre.

El proceso de extracción de la pieza se realiza con ayuda de expulsores, los cuales son barras cilíndricas pequeñas en su mayoría, que se atraviesan el interior del molde empujando la pieza dentro de la cavidad. La única función de estos expulsores es separar la pieza final del molde, y estos pueden ser pasadores cilíndricos, casquillos de expulsión, mordazas deslizantes, expulsores por aire a presión, extractores de plato o anillos o casquillos de expulsión.

El sistema debe contemplar una fuerza de expulsión determinada, la cual debe vencer la fuerza de la pieza con la que se adhirió a las paredes del molde, pero sin dañarla, porque dañaría la pieza y no cumpliría con los estándares de calidad. Para aplicar la fuerza correcta sin afectar la pieza, esta se distribuye en varios expulsores a lo largo del molde, ubicados en puntos estratégicos en donde la resistencia es mayor, por ejemplo, en equinas o paredes verticales. Estos puntos, en donde la resistencia es mayor, corresponden a la ley de la palanca, la cual establece que cuanto menor sea la distancia al punto, mayor será la fuerza que soporta. Normalmente estos expulsores dejan marcas en la pieza final, es por lo que en el diseño se trata de ubicar los expulsores en lugares no visibles del producto final para mantener su estética (Sánchez & Torres, 2014).

## G. Calor eléctrico

El calor eléctrico se genera cuando fluye corriente eléctrica por un conductor, la cual provoca que los electrones de éste choquen contra las moléculas del cuerpo intensificando su movimiento, aumentando así la energía cinética y las vibraciones de las partículas, por ende, se produce un aumento de temperatura. La cantidad de calor por el flujo de corriente sobre

un conductor depende de la resistencia del cuerpo, la intensidad de corriente y el tiempo; y se expresa mediante la ley de Joule-Lenz. La ley de Joule-Lenz establece que la cantidad de energía en forma de calor disipado en un conductor depende de la corriente eléctrica que pasa por el conductor, la resistencia y el tiempo, como se muestra a continuación:

$$Q = I^2 R t \quad (1)$$

En donde:

Q = Energía disipada en forma de calor (J) I = Corriente eléctrica (A) R = Resistencia ( $\Omega$ ) t = Tiempo (s)

Los conductores que disipan energía en forma de calor aumentarán su temperatura hasta que la cantidad de calor obtenido sea igual al calor entregado al medio. La temperatura del conductor dependerá de la corriente eléctrica, la sección transversal y material del mismo, y las condiciones ambientales. Cabe mencionar que, la longitud no es un parámetro que afecte a la temperatura del conductor, ya que la longitud afecta la superficie de refrigeración del conductor. Generalmente, se busca reducir el material del conductor y maximizar la corriente para generar calor y reducir costos, pero todos los conductores están limitados a una temperatura límite de operación, ya sea para preservar el material o para evitar deterioros. Es por ello que los conductores se seleccionan en función de la sección transversal para una densidad de corriente específica que no supere una temperatura límite de operación. Estos datos son proporcionados por los proveedores (Kuznetsov, 1967).

## H. Transferencia de calor mediante resistencias eléctricas

El uso de resistencias eléctricas para calentar moldes es un método alternativo más económico que el uso de aceite caliente o vapor de agua, los cuales presentan transferencias de calor más eficientes pero a mayor costo y mantenimiento. Las resistencias eléctricas son introducidas en agujeros perforados y escariados con holgura mínima entre la superficie interna y las resistencias. Para asegurar una transferencia de calor máxima, los agujeros deben presentar una combinación entre acabado superficial y holgura mínima con las resistencias. Se requieren de dos cálculos básicos para determinar el número apropiado de resistencias eléctricas a utilizar en un molde. El primer cálculo determina la potencia requerida para calentar el molde a la temperatura de operación dado un tiempo específico y se expresa de la siguiente manera:

$$E = W S T / t \quad (2)$$

En donde:

- E = Potencia requerida (W)
- W = Masa del material del molde (kg)
- S = Calor específico del material del molde (J/kg\*°C)

- $T$  = Cambio de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )
- Tiempo que tarda en alcanzar la temperatura de operación (s)

(Drozda & Society of Manufacturing Engineers, 1996).

## A. Descripción de metodología

El módulo de calentamiento y molde debía producir un ladrillo a partir de residuos de botellas PET similar a un ecoladrillo que validara la funcionalidad de una unidad de reciclaje en conjunto con otros módulos. Para lograrlo, el sistema debía de cumplir con ciertas características y especificaciones de diseño para la compactación de plástico. Se realizó un proceso distribuido en 4 fases para lograr el objetivo planteado:

La primera fase, a partir de la investigación preliminar de las propiedades térmicas del PET, se determinó la condición térmica de operación, el cual fue el rango de temperatura apropiado para moldear adecuadamente el material dentro del molde diseñado a partir de un “ecoladrillo”. Fue un rango de temperaturas que no comprometieran al molde diseñado, al igual que los residuos de botellas PET, es decir, sin quemarlos. Se realizaron pruebas preliminares de moldeo de plástico con un molde genérico para validar el rango de temperatura seleccionado para la operación. Después de definir el rango de temperatura de operación, se determinaron las resistencias eléctricas necesarias para lograr un calentamiento homogéneo y cumplieran con los valores de temperaturas requeridos.

Continuando con la segunda fase, después de obtener el rango de temperaturas y la presión de compactación de operación, a partir del módulo de compresión, se seleccionó el material adecuado para el diseño del molde. El material seleccionado debía soportar dichos parámetros y que se encontrara en disponibilidad en el mercado dentro de la región. Se procedió a diseñar el modelo en 3D del molde con el diseño del ladrillo de plástico con las medidas adecuadas para su acople con los módulos de compactación así como el de la carcasa y estructura. Además, debía satisfacer los requisitos funcionales y operacionales propuestos para este módulo. Por otro lado, se determinaron los procesos de manufactura y las herramientas necesarias para la fabricación el molde, disponibles en la Universidad del

Valle de Guatemala.

En cuanto a la tercera fase, se fabricó molde a partir del diseño 3D utilizando procesos de manufactura en la UVG, de los cuales se encuentran la fresadora y el torno, empleando las herramientas disponibles capaces de maquinado el material seleccionado. Después de cada maquinado, se tomaron las medidas del molde para compararlo con el diseño realizado y finalizar el proceso de manufactura.

Por último, la cuarta fase consistió en realizar pruebas para validar el funcionamiento del sistema, obteniendo un producto final adecuado que satisfaga los requisitos que cumple un ecoladrillo convencional para la construcción de infraestructura, se asegurara la integridad del sistema sin que sufra daños y cumpliera con los requerimientos del módulo para su futura operación de moldeo.

## **B. Identificación de necesidades**

Se obtuvo un contacto con el Centro Educativo Chixot por medio de la persona encargada de la realización de los proyectos sostenibles que se llevan a cabo dentro de este. Se realizaron dos entrevistas virtuales con esta persona. En la primera, se tocaron puntos como el tipo de proyectos que se llevan a cabo en el centro y los desafíos que estos representan para el personal. Se nos explicó que los proyectos llevados a cabo se realizan, en su mayoría, utilizando plástico reutilizado. Pero concretamente, se enfocó en el proyecto de realización de techos y paredes por medio de partes de botellas PET y en las dificultades que conlleva. Se identificó una necesidad a raíz de estos procedimientos, ya que, para la construcción de los techos, se crean tejas de plástico provenientes de las botellas, pero utilizando únicamente la parte central de esta. Dejando así, como residuos, la parte superior e inferior. Actualmente no se utilizan estos residuos.

Por otro lado, también se nos mencionó que fabrican ecoladrillos para la creación de muros. Estos se crean a base de botellas PET completas rellenas de otros desechos sólidos como bolsas de supermercados, bolsas de comida, tapas de botellas, etc. Estos ladrillos son apilados con una configuración que permite armar muros resistentes y que pueden ser utilizados para crear salones de clases o bodegas para el centro.

En la segunda entrevista realizada con el contacto del centro, se tocó el tema relacionado a la solución al problema de sus residuos de PET por la fabricación de tejas para techos. Se dio a entender que sería de gran ayuda contar con una forma de poder utilizar dichos residuos para la creación de los ecoladrillos que ya se fabrican. De esta forma, se podría sacar provecho de los residuos PET y se podría volver más eficiente el proceso de fabricación de ladrillos. Se discutió la posibilidad de diseñar una máquina capaz de cumplir con estas dos funciones, por lo que se preguntó por datos relacionados a dimensiones de los ladrillos necesitados, concretamente hablando de tamaño y peso. Por lo tanto, se decidió comenzar el proceso de diseño y manufactura de la unidad de reciclaje que cumpla con los propósitos discutidos.

## C. Definición de requisitos

Cuadro 2: Requerimientos generales

<b>Código</b>	<b>Requerimientos</b>
FSCM-001	El molde debe ser manufacturado con un material de baja ductilidad para que no se deforme por la fuerza máxima de 1 ton o calor a una temperatura máxima de 180 °C.
FSCM-002	El molde debe ser capaz de abrirse por la mitad en su longitud dividiéndose en dos cavidades independientes para extraer el producto de plástico compactado y debe ser capaz de cerrarse nuevamente.
FSCM-003	Las piezas del molde deben estar alineadas para encerrar completamente a la cavidad en el interior.
FSCM-004	El sistema de calentamiento y molde debe acoplarse al sistema de compresión.

Cuadro 3: Requerimientos operacionales

<b>Código</b>	<b>Requerimientos operacionales</b>
OSCM-001	El molde debe ser manipulado por una persona con ambas manos.
OSCM-002	El sistema de calentamiento debe de removerse del molde con ambas manos.
OSCM-003	El sistema de calentamiento debe mantenerse fijo al molde durante la operación.
OSCM-004	El sistema de calentamiento debe conectarse con las manos y sin esfuerzo al sistema eléctrico.

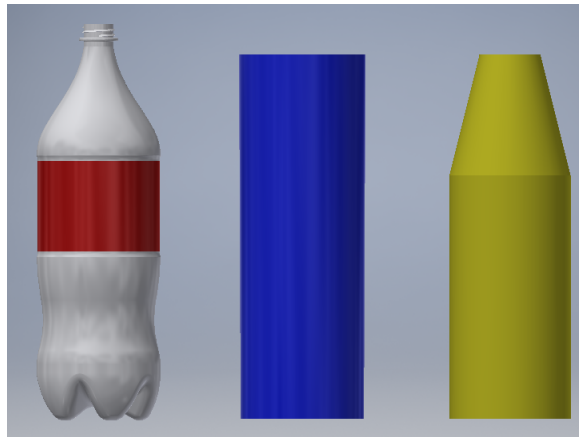
Cuadro 4: Limitantes

<b>Código</b>	<b>Limitantes</b>
LSCM-001	El molde debe tener un peso de 15 a 30 lbs.
LSCM-002	El molde debe tener un tamaño máximo de 50cm x 20cm x 20 cm (aproximadamente más grande que una botella de 2L).
LSCM-003	El molde debe tener un tamaño mínimo de un volumen cúbico donde quepa una botella de 2L.
LSCM-004	El mantenimiento del molde y del sistema de calentamiento deben ser replicables en el centro educativo.

## D. Diseño preliminar

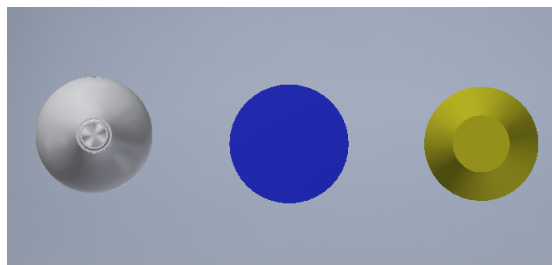
Para la realización del sistema del molde y calentamiento, este debe ser diseñado a partir de la forma del ecoladrillo a fabricar. Se realizaron dos propuestas que se asimilan a la forma de una botella de plástico PET de 2L que actualmente se utiliza para la fabricación de los ecoladrillos convencionales. El primero es un cilindro completo con la altura y diámetro máximo de una botella convencional. El segundo, un cilindro con una terminación cónica que asimila la boquilla de una botella convencional. Ambas propuestas pueden verse comparadas en las figuras 1 y 2 contra una botella convencional PET de 2L.

Figura 1: Propuestas de ecoladrillo, vista frontal



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2: Propuestas de ecoladrillo, vista superior



Fuente: Elaboración propia.

Se eligió el primer diseño de ecoladrillo, el cilindro completo azul en las figuras 1 y 2, debido a la preferencia de este por parte del encargado del Centro Educativo Técnico Chixot. Ya que este diseño completamente cilíndrico se adapta a las necesidades de construcción con ecoladrillos convencionales al momento de apilarlos unos encima de otros. El diseño completamente cilíndrico presenta un diámetro de 4 pulgadas (alrededor de 10 cm) y un alto de 30 cm; ya que estas son las medidas más grandes de una botella PET de 2L.

Con base en la forma seleccionada, se realizó el primer diseño del molde con su respectiva cavidad completamente cilíndrica, el cual constaría de una sola pieza. Esto se debió a que se obtendría a partir de un tubo de acero de diámetro interno de 4 in. Adicionalmente, se agregó un anillo externo en diámetro exterior del molde para fijarlo a la base, por medio de tornillos de 1/4 in, y restringir su movimiento hacia arriba en caso se genere una fuerza de fricción entre el plástico compactado y la pieza compresora. Lo cual produzca una separación entre el molde y la base.

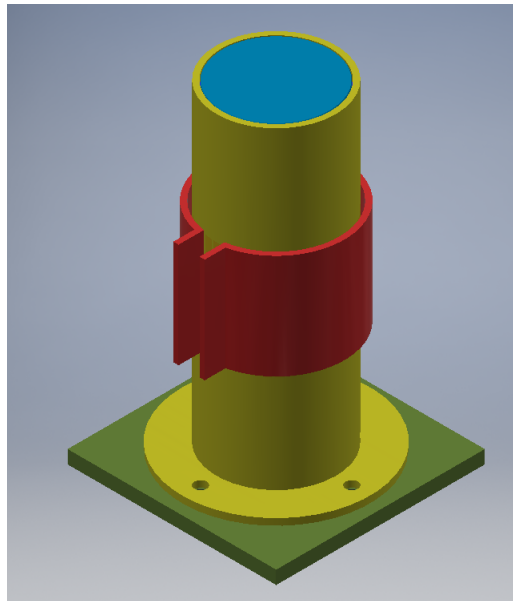
Inicialmente, debido a que se debe implementar un sistema de calentamiento para el moldeo, se tomó en consideración el uso de una resistencia de banda o abrazadera de mica para la generación de calor, la cual rodea todo el molde por su diámetro exterior, la cual permitiría una transferencia de calor homogénea a lo largo de su circunferencia.

Se utiliza este tipo de resistencia calefactora porque comúnmente se emplean en aplicaciones de moldeo de plástico como es la inyección o extrusión y, además, se ajusta a la forma cilíndrica del molde. Debido a la forma cilíndrica de la resistencia, no sería posible la separación del molde en dos partes independientes sin remover la resistencia. Para evitar la manipulación de esta durante la operación de moldeo y proteger su integridad y la del usuario ante quemaduras, se diseñó un posible sistema de extracción del ecoladrillo por la parte inferior del molde, como se muestra en las figuras 3 y 4. El sistema de extracción contaría con un pin expulsor, retirando el ecoladrillo desde la parte inferior de la base hacia arriba del molde.

En lo que atañe a la pieza compresora, aquella que se sujetará al sistema de compresión que ejercerá la fuerza necesaria para compactar el plástico y es la pieza que encierra la cavidad del interior. Se consideró una placa de acero circular de diámetro inferior a las 4 in para mantener cierta holgura entre el molde y la pieza compresora, y así pueda desplazarse libremente sin interferir con las paredes internas.

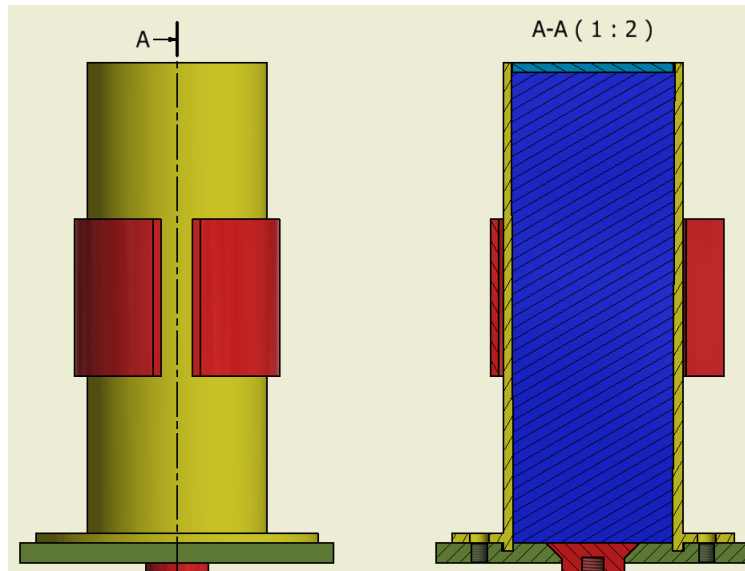
En cuanto a la base, esta sería de una placa de acero con una guía interna circular en el centro en donde asentaría el molde y mantener su posición durante la operación. Adicionalmente, se fijaría el molde a la base por medio de un aro soldado en la parte inferior del molde, utilizando tornillos a lo largo de su circunferencia.

Figura 3: Isométrico del molde, diseño 1



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4: Plano del molde, diseño 1



Fuente: Elaboración propia.

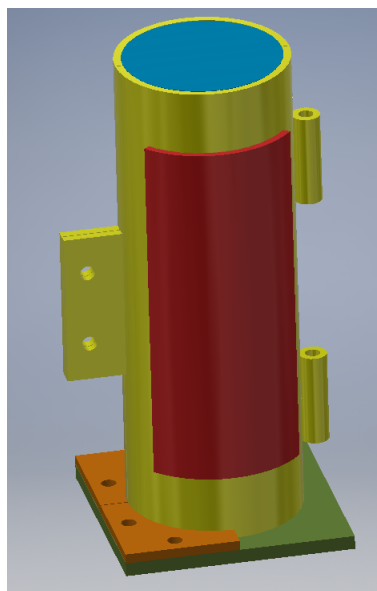
Para simplificar el diseño y la extracción del ecoladrillo, se propuso rediseñar el molde con dos cavidades simétricas, en donde serían piezas semicirculares independientes. Empleando dos partes que puedan abrirse y cerrarse, se descarta el uso del pin de extracción para retirar

la pieza, además, ya no podría utilizarse una resistencia de abrazadera que rodee al molde, ya que interferiría en su apertura para retirar el ecoladrillo. Por ende, se debería manipular constantemente la resistencia, la cual estaría sujeta a riesgos de ruptura y/o de quemadura para el usuario. Por ende, se consideró el uso de dos resistencias planas con cierta curvatura para ajustarse a la superficie en lados opuestos y perpendicular a la apertura del molde, una en cada cavidad, evitando así la manipulación de estas y facilitando la extracción del ecoladrillo.

Asimismo, el calor a transferir puede dispersarse de manera homogénea a lo largo del molde, ya que una resistencia de abrazadera que cubra gran parte de la altura del molde no es posible de manufacturar por proveedores locales. Por otro lado, se agregaron bisagras en la parte trasera para facilitar el movimiento de cierre y apertura del molde. De esta manera, el operario no deberá introducir las manos dentro del área de trabajo para abrir o cerrar el molde y evitar posibles quemaduras al momento de retirar la resistencia. Cabe añadir que, se agregó una pestaña con agujeros en cada parte del molde por la parte frontal para asegurar el cierre entre las cavidades por medio de tornillos de 1/4 in y prevenir la separación de estas por la presión interna que pueda ejercer el plástico al momento de ser compactado.

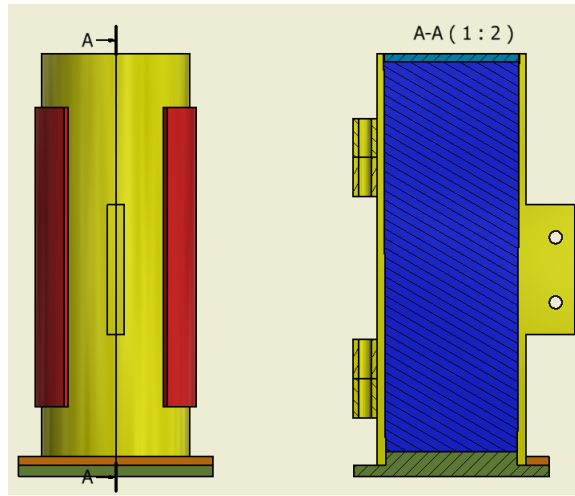
En cuanto a la base del molde, se sustituyó la guía interna por una guía externa por la complejidad de la unión entre el disco externo y el molde para la sujeción mencionada anteriormente, el cual debía estar a una altura elevada para asegurar que el molde se insertara en la base. Es por ello que la guía del molde podría introducirse en la parte inferior del mismo, para asegurar un ajuste con juego entre las piezas y fijar la posición del molde. El disco externo sería sustituido por dos placas que se ajusten a la superficie externa cuadrada de la base y a la superficie cilíndrica del molde. Este diseño puede observarse en las figuras 5 y 6.

Figura 5: Isométrico del molde, diseño 2



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6: Plano del molde, diseño 3



Fuente: Elaboración propia.

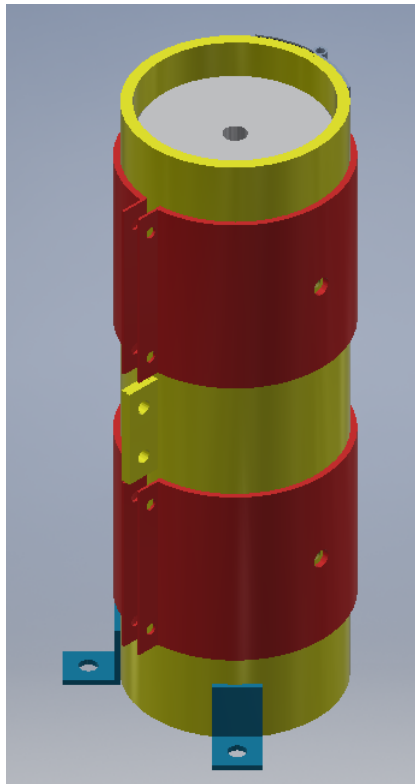
## E. Diseño final

### 1. Molde y resistencias

Debido a la complejidad de manufacturar resistencias planas con curvatura por la fragilidad de las mismas para brindar la forma del molde y por la longitud muy grande, se optó por dividir las entradas de calor utilizando resistencias de media luna más pequeñas de largo, las cuales son de abrazaderas pero hasta la mitad de la circunferencia del molde. Se propuso utilizar un par de resistencias para rodear completamente el molde, y se propuso implementar dos juegos de resistencias para cubrir el alto del molde y garantizar una temperatura uniforme. Siendo así un total de 4 resistencias media luna para un molde.

Las resistencias cuentan con pestañas con agujeros para que sean fijadas al molde y se sujeten entre sí por medio de tornillos de  $1/4$  in. Dado que el molde debe tener espacio suficiente para las bisagras traseras para abrir y cerrar el molde; y para pestañas frontales que aseguren el cierre del mismo, se acordó un alto de 100 mm para cada resistencia. Con esa altura, se tiene espacio suficiente para colocar los accesorios de apertura y cierre. Estas resistencias operarán a 120 voltios ya que es la tensión disponible en el Centro Técnico Chixot. En cuanto a la potencia, esta se determinó empleando la fórmula en la sección de "Trasnferencia de calor mediante resistencias eléctricas" del marco teórico, el cual se mostrará más adelante en la sección de cálculos. Cabe añadir que, las resistencias cuentan con un agujero en el centro para la posibilidad de introducir una termocupla tipo K y medir la temperatura en esa región del molde. La termocupla tipo K es el sensor de temperatura metálico más común en la industria, por su bajo costo y alto rango de medición. El diseño final del molde puede observarse en la Figura 7.

Figura 7: Isométrico del molde, diseño final



Fuente: Elaboración propia.

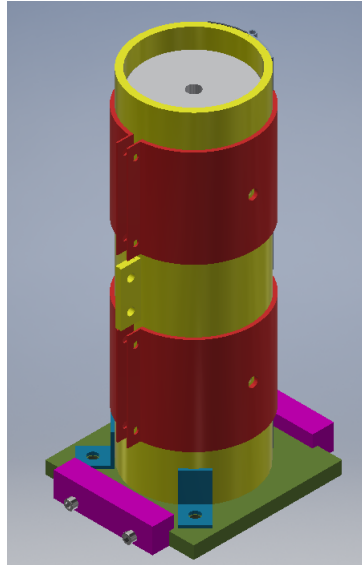
Se debe destacar que, estas pestañas, únicamente se encuentran en la parte frontal del molde, porque limitarían la apertura del mismo al topar entre sí en el caso se tuvieran del mismo lado de las bisagras. Por lo tanto, para sujetar las resistencias por la parte trasera del molde, se colocarán tornillos de 1/4 in con una tuerca justo en el agujero en el centro de la resistencia. A excepción de la resistencia que tenga la termocupla, esta misma la mantendrá fija en su lugar.

## 2. Base

A causa de las limitantes de materiales y perfiles disponibles en el mercado local, no hay placas tan gruesas de acero para fabricar la base, la cual debe de disponer de suficiente espesor de pared para maquinarse la guía del molde y asentarse correctamente. Por otro lado, si la base fuera hecha de acero, aumentaría considerablemente el peso del molde y el maquinado de piezas sería más complicado, debido a que es un material muy duro. Por lo tanto, se utilizarán barras rectangulares sólidas de aluminio 6061, las cuales son más gruesas. Pero, al ser más pequeñas en cuanto al ancho del perfil, se sujetarán dos piezas por medio de uniones que se colocarán sobre las caras frontal y trasera de las piezas. Estos sujetadores asentarán sobre la superficie superior de las piezas y se fijarán por medio de tornillos de 1/4 in. Como se puede mostrar en la Figura 8, en donde la base se encuentra ensamblada por dos piezas iguales que forman la guía cilíndrica del molde.

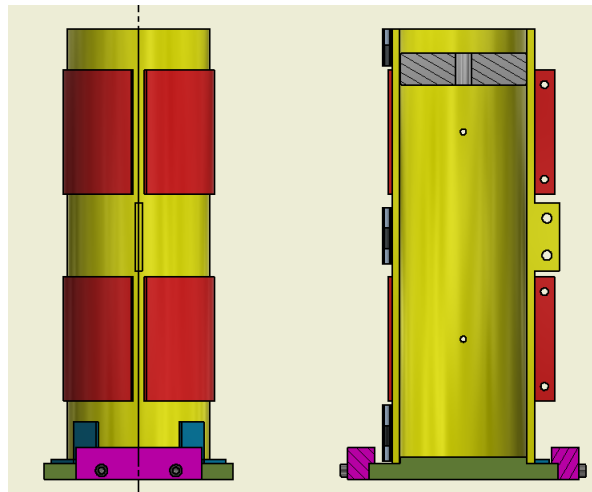
En las figuras 8 y 9 se pueden observar el ensamble completo del molde con su respectiva base y el sistema de calentamiento con 4 resistencias media luna.

Figura 8: Plano del molde y sistema de calentamiento, diseño final



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9: Plano del molde y sistema de calentamiento, diseño final

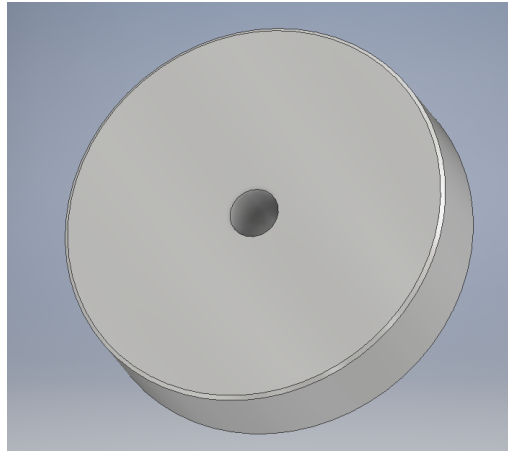


Fuente: Elaboración propia.

### 3. Pieza compresora

Debido al mismo inconveniente para la base, a falta de material, se optó por utilizar una barra de aluminio 6061 para maquinar la pieza compresora de diámetro ligeramente inferior a las 4 in (101.6 mm), aproximadamente de 2 a 4 mm más pequeño. Porque si dicha pieza compresora fuera del mismo diámetro que se forma en las cavidades del molde, se tendría el riesgo de una interferencia con las superficies internas y no se generaría la compresión. Cabe mencionar que, la pieza compresora sería más gruesa de lo esperado debido a la presentación de la barra de aluminio. Pero esto es beneficioso ya que brindará mayor estabilidad durante el proceso de compactación debido a la rigidez por el espesor de pared de la pieza. La pieza compresora tendrá un agujero pasado de 13 mm para introducir un tornillo allen de 1/2 in y fijarlo al sistema de compresión.

Figura 10: Pieza compresora, diseño final



Fuente: Elaboración propia.

## F. Cálculos

Para analizar cómo se disipa el calor de las resistencias eléctricas y cuánto tiempo demora para alcanzar una temperatura máxima, es necesario realizar una simulación de transferencia de calor con el *software* ANSYS. Para la simulación, se debe especificar una condición de temperatura inicial o una convección en la superficie del molde. Una condición inicial de temperatura del molde ejemplificaría el caso de transferencia de calor con el ambiente, con el objetivo de analizar el enfriamiento del mismo y el tiempo necesario para alcanzar un equilibrio térmico. Por lo tanto, se requiere una condición de convección para ejemplificar las pérdidas de calor por convección natural debidas al aire en el ambiente en donde se encuentra el molde, porque el molde se encontrará dentro de un espacio cerrado donde la velocidad del aire prácticamente 0 debido a que no habrá ninguna corriente de aire.

Se debe tomar en consideración que el molde se conforma por dos partes principales: las cavidades que forman un cilindro vertical y la base que se puede ejemplificar como una placa horizontal. Para cada parte, la convección en una superficie depende de la configuración

geométrica y de la orientación de ésta (Çengel & Ghajar, 2011). Por lo tanto, se calculó dos coeficientes de convección para cada configuración geométrica del molde y la base.

Cada condición de convección requiere su respectivo coeficiente, el cual se debe calcular con la ecuación del número de Nusselt:

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (3)$$

Despejando para el coeficiente de convección se obtiene que:

$$h = \frac{Nuk}{D} \quad (4)$$

En donde:

- Nu = Número de Nusselt
- h = Coeficiente de convección (W/mm<sup>2</sup>\*K)
- D = Diámetro exterior del molde (m)
- k = Coeficiente de conductividad térmica del aire (W/m\*K)

Para el cálculo del coeficiente de convección en la base del molde, el cual puede considerarse una placa horizontal, se utilizan las siguientes expresiones:

$$Nu = 0.54Ra_L^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

$$[10^4 < Ra_L < 10^7]$$

$$Nu = 0.15Ra_L^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

$$[10^7 < Ra_L < 10^{11}]$$

En donde Ra es el número de Rayleigh, el cual se calcula de la siguiente forma:

$$Ra = \frac{Pr g \beta (T_s - T_\infty) L_c^3}{\nu^2} \quad (7)$$

En donde:

- Pr = Número de Prandtl
- g = gravedad (m/s<sup>2</sup>)
- $\beta$  = Coeficiente de expansión volumétrica (1/K) (1/T<sub>prom</sub>)
- T<sub>s</sub> = Temperatura de la superficie (°C)
- T<sub>∞</sub> = Temperatura del fluido lejos de la superficie (°C)
- L<sub>c</sub> = Longitud característica de la configuración geométrica (m)

- $\nu =$  Viscosidad cinemática del fluido ( $m^2/s$ )

La longitud característica para una placa horizontal se calcula de la siguiente forma:

$$L_c = \frac{A_s}{P} \quad (8)$$

En donde  $A_s$  es el área superficial y  $P$  el perímetro de la placa (ambos valores obtenidos a partir de los diseños 3D):

$$L_c = \frac{0.0149m^2}{1.03m} = 0.01449m$$

Cabe añadir que, todas las propiedades del aire como el número de Prandtl, el coeficiente de conductividad térmica y la viscosidad cinemática, son propiedades a la temperatura promedio entre el molde y el ambiente. Para este caso se supuso una temperatura ambiente de  $22^\circ C$  y una temperatura del molde de  $180^\circ C$ , ya que esta es la temperatura máxima posible en donde el PET no alcanza su punto de fusión. Por lo tanto:

$$T_{prom} = \frac{180^\circ C + 22^\circ C}{2} = 101^\circ C$$

Las propiedades del aire a la temperatura promedio, según la tabla A-15 del libro *Transferencia de calor y masa* de Yunus A. Cengel, son las siguientes:

- $Pr = 0.711$
- $k = 0.031 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- $\nu = 2.32 * 10^5 m^2/s$
- $\beta = \frac{1}{(101+273)K} = 0.0027K^{-1}$

Empleando las ecuaciones anteriores, se calculó un número de Rayleigh de  $1.67 * 10^4$ . Como el número de Rayleigh se encuentra entre el rango de  $10^4 - 10^7$ , se utilizó la primera expresión para calcular el número de Nusselt, el cual fue de 6.14. Posteriormente, utilizando la ecuación para determinar el coeficiente de convección, se calculó un coeficiente de  $1.31 * 10^{-5} W/mm^2\cdot K$ .

Para el cálculo del coeficiente de convección en las cavidades del molde, las cuales pueden considerarse un cilindro vertical, se tiene el siguiente supuesto: si  $D \geq \frac{35L}{G_L^{1/4}}$ ; se puede considerar como una placa vertical. Se tomó en cuenta este supuesto según el libro *Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones* de Yunus A. Cengel y Afshin J. Ghajar.

En donde  $G_L$  es el número de Grashof y se calcula con la siguiente ecuación:

$$G_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} \quad (9)$$

Utilizando las mismas condiciones de aire mencionadas anteriormente, se obtiene un número de Grashof de  $3.31E8$ . Usando  $L_c$  como la longitud nominal del cilindro (0.35 m) y el diámetro de 4 in (0.114 m), se obtiene que:

$$D = 0.114m \geq \frac{35(0.35m)}{(3.31 * 10^8)^{\frac{1}{4}}} = 9.08 * 10^{-2} \quad (10)$$

Dado que se cumple el supuesto, se utilizó la ecuación para el cálculo del número de Nusselt para una placa vertical:

$$Nu = 0.825 + \frac{0.387Ra_L^{\frac{1}{6}}}{[1 + (0.492/Pr)^{\frac{9}{16}}]^{\frac{8}{27}}} \quad (11)$$

Empleando las ecuaciones anteriores, se calculó un número de Rayleigh de  $2.35 * 10^8$ , y así obtener un valor de 78.98 para el número de Nusselt. Utilizando la ecuación para determinar el coeficiente de convección, se calculó un coeficiente de  $7.00 * 10^{-6} W/mm^2 * K$ .

En cuanto al cálculo de la potencia de cada resistencia eléctrica necesaria para calentar el molde, se utilizó la siguiente ecuación:

$$E = WST/4t \quad (12)$$

En donde:

- E = Potencia requerida (W)
- W = Masa del material del molde (7.44 kg)
- S = Calor específico del material del molde (470 J/kg\*°C)
- T = Cambio de temperatura (180 °C - 22 °C = 158 °C)
- t = Tiempo que tarda en alcanzar la temperatura de operación (5-10 min)

Se divide entre 4 debido ya que son 4 resistencias. Se espera que el calentamiento no se demore tanto tiempo, se estima que debe durar entre 5 y 10 minutos para que la operación de fabricación del ecoladrillo sea rápido en comparación a la fabricación de ecoladrillos convencionales. Por lo tanto, se empleó la ecuación para ese rango de tiempo y se escogió el valor intermedio:

$$E_{5min} = \frac{470 * 7.44 * 158}{4 * (5 * 60)} = 460.41W$$

$$E_{6min} = \frac{470 * 7.44 * 158}{4 * (6 * 60)} = 383.68W$$

$$E_{7min} = \frac{470 * 7.44 * 158}{4 * (7 * 60)} = 328.86W$$

$$E_{8min} = \frac{470 * 7.44 * 158}{4 * (8 * 60)} = 287.75W$$

$$E_{9min} = \frac{470 * 7.44 * 158}{4 * (9 * 60)} = 254.17W$$

$$E_{10min} = \frac{470 * 7.44 * 158}{4 * (10 * 60)} = 228.75W$$

El valor intermedio está entre 328.86 W y 287.75 W entre un tiempo de 7 y 8 minutos. El promedio entre los valores de potencia es de 308.3 W, por lo tanto, se utilizó una potencia de 300 W para cada resistencia, ya que es un valor comercial de resistencias en el mercado.

Posteriormente, teniendo los coeficientes de convección natural, la temperatura ambiente y la potencia de cada resistencia como condiciones iniciales, se procedió a realizar la simulación en ANSYS con los diseños 3D. El objetivo de las simulaciones fue estimar el tiempo necesario para alcanzar la temperatura límite de 180 °C, justo antes del punto de fusión del PET. Además, se realizó una simulación con temperatura inicial de 180 °C (temperatura final de la primera simulación) para estimar el tiempo de que tardaría del molde para alcanzar una temperatura para su manipulación segura, aproximadamente de 45 °C utilizando guantes de protección.

## 1. Configuración de simulaciones en ANSYS

Como primer paso, se ingresó la información de las propiedades térmicas y estructurales de los materiales Acero A36 para el molde, mica para las resistencias eléctricas, aluminio 6061 para la base y la pieza compresora, y PET para el ecoladrillo, en el apartado de *Engineering Data*. Cabe añadir que, la librería de materiales de ANSYS cuenta con materiales ya establecidos como PET y Aluminio 6061 (*Aluminium Alloy 6061*), y se observó que el material *Structural Steel* presenta propiedades muy similares al acero A36 ingresado.

Figura 11: Materiales

The screenshot shows the ANSYS Engineering Data interface. The main window displays a list of materials with their properties. The 'Properties of Outline Row 3: A36' window is open, showing the following data:

Property	Value	Unit
Density	7.9	g cm^-3
Isotropic Elasticity	Derive from	
Young's Modulus	190	GPa
Poisson's Ratio	0.29	
Bulk Modulus	1.5079E+11	Pa
Shear Modulus	7.3643E+10	Pa
Tensile Yield Strength	2.9E+05	MPa
Tensile Ultimate Strength	4.8E+05	MPa
Isotropic Thermal Conductivity	50	W m^-1 K^-1
Specific Heat Constant Pressure, C <sub>p</sub>	470	J kg^-1 K^-1

Fuente: Elaboración propia.

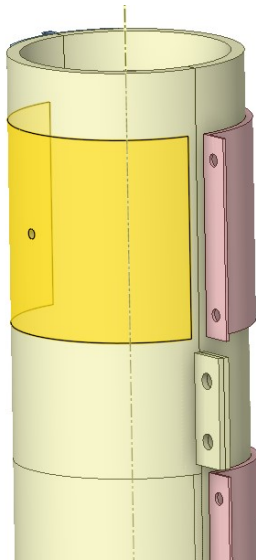
Cuadro 5: Propiedades de materiales

Propiedades	A36	Alumino 6061	Mica
Densidad	7.9 g/cm <sup>3</sup>	2.7 g/cm <sup>3</sup>	2.6 g/cm <sup>3</sup>
Modulo de Young	190 GPa	68 GPa	71 GPa
Razón de Poisson	0.29	0.33	0.3
Esfuerzo de fluencia	290 MPa	126 MPa	39 MPa
Esfuerzo último de tensión	480 MPa	147 MPa	-
Conductividad térmica	50 W/m*K	200 W/m*K	23 W/m*K
Calor específico (presión constante)	470 J/Kg*K	900 J/Kg*K	500 J/Kg*K

Fuente: <https://www.makeitfrom.com>

Como siguiente paso, se procedió a generar las superficies en los moldes para las entradas de calor, las cuales simularían a las resistencias eléctricas. Para ello, se editó la geometría en *SpaceClaim* y se utilizó la función *split* para dividir las superficies externas de las cavidades del molde a partir de las resistencias media luna.

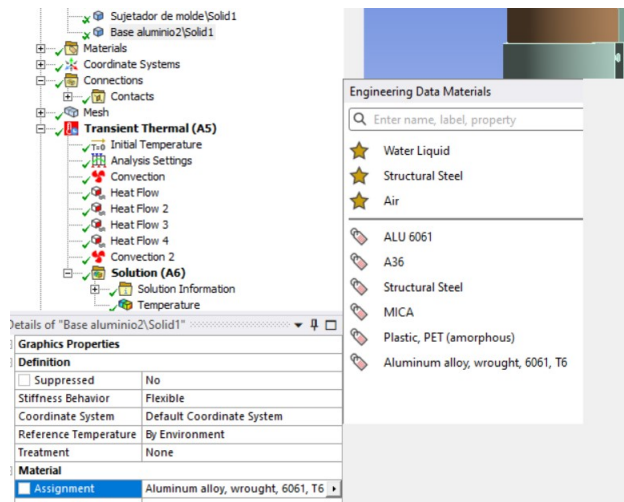
Figura 12: Generación de superficies



Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, en la sección del modelo, se debe asignar a cada parte de la geometría su respectivo material en la opción *assignment*.

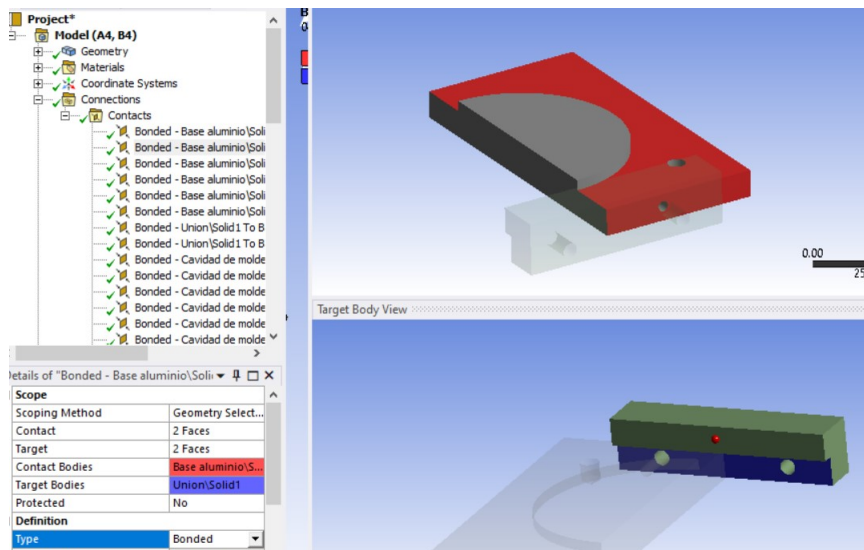
Figura 13: Asignación de material



Fuente: Elaboración propia.

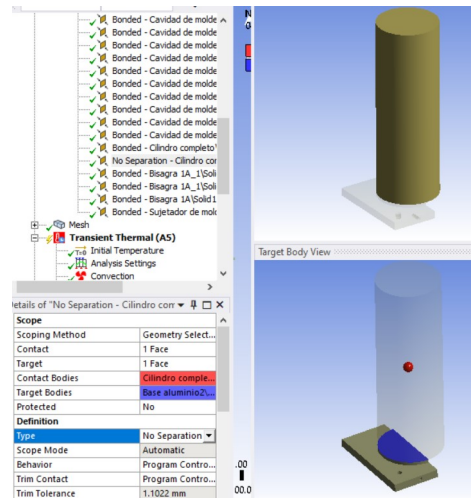
Luego, deben de crearse los contactos entre todas las piezas de la geometría. Para este caso, todas las partes del molde tienen el contacto *bonded*, ya que se espera que ninguna pieza pueda moverse durante la operación. Con excepción de los contactos con el ecoladrillo, para éstos se utilizaron *no separation*, porque, al ser comprimido, el ecoladrillo puede desplazarse por la superficie interna del molde cuando se deforme.

Figura 14: Contacto *bonded*



Fuente: Elaboración propia.

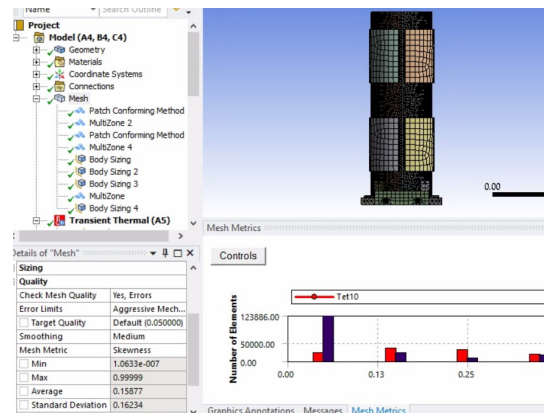
Figura 15: Contacto *no separation*



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al *mesh*, se buscó tener un mallado fino en las partes principales de la geometría (el ecoladrillo, las cavidades del molde y la base). Para determinar la calidad del mismo se utilizó la medida del *skewness* buscando valores cercanos a cero. Para ello se utilizaron varios *sizings* para reducir el tamaño de los elementos de las partes principales. Adicionalmente se utilizaron métodos como multizona y tetrahedros para mejorar la calidad del mallado. Con estos parámetros se obtuvo un *skewness* promedio de 0.15877.

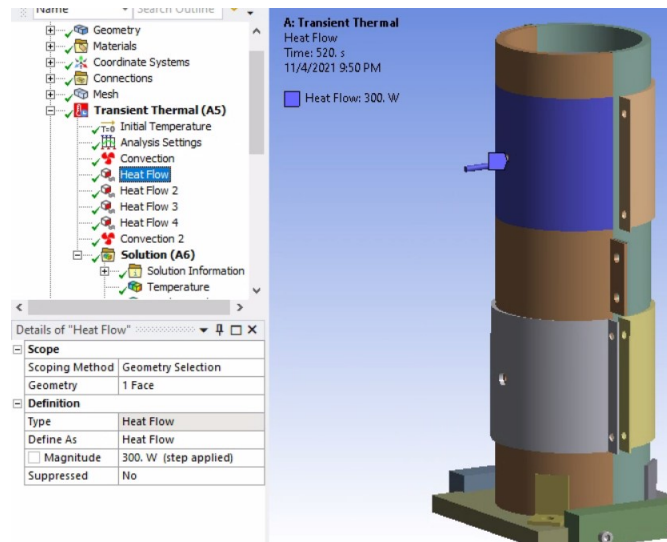
Figura 16: Mallado



Fuente: Elaboración propia.

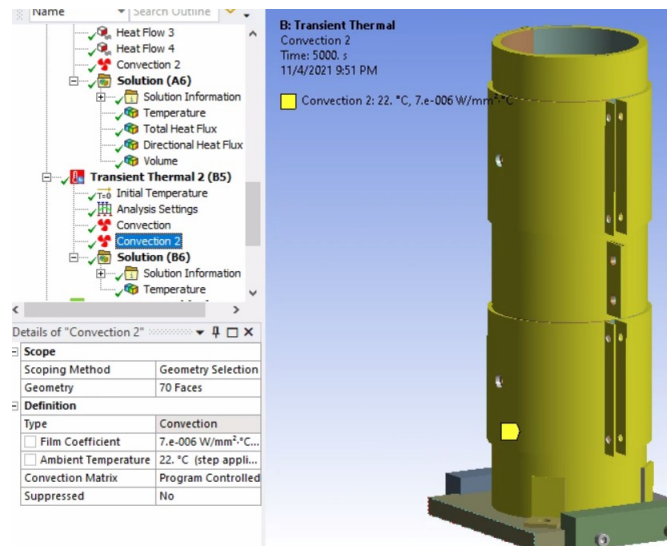
En cuanto a los parámetros de transferencia de calor, se asignaron 4 *heat flow* de 300 W cada uno en las superficies generadas anteriormente. Estos *heat flow* se orientaron hacia el centro del molde para ejemplificar el calor proporcionado por las resistencias media luna. Por otro lado, se asignaron las condiciones de convección calculadas anteriormente. El primero de  $1.31 \times 10^{-5} W/mm^2 \cdot K$  se empleó en todas las superficies exteriores de la base (simulando una placa horizontal), y el segundo de  $7.00 \times 10^{-6} W/mm^2 \cdot K$  sobre todas las superficies del molde (simulando una placa vertical). Además, se colocó una temperatura inicial de 22 °C.

Figura 17: Heat flow



Fuente: Elaboración propia.

Figura 18: Convección



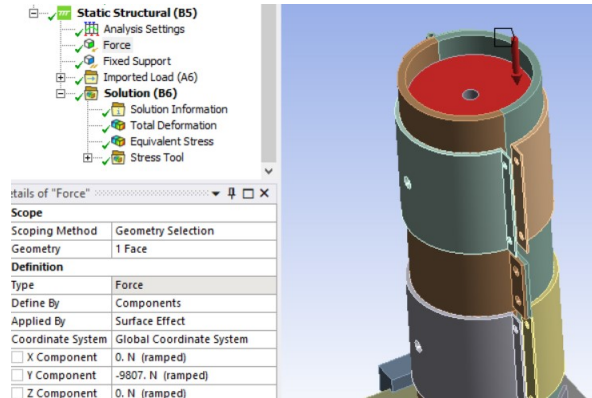
Fuente: Elaboración propia.

Por último se colocó el tiempo total de la simulación y se seleccionó el resultado de temperatura.

Para la simulación de enfriamiento del molde en el que se estimó el tiempo necesario que tardaría el sistema en disminuir su temperatura a una temperatura segura de manipulación como aproximadamente 45 °C. Se utilizó la misma configuración anterior, omitiendo las entradas de calor de 300 W y utilizando la temperatura final de la simulación anterior como la temperatura inicial.

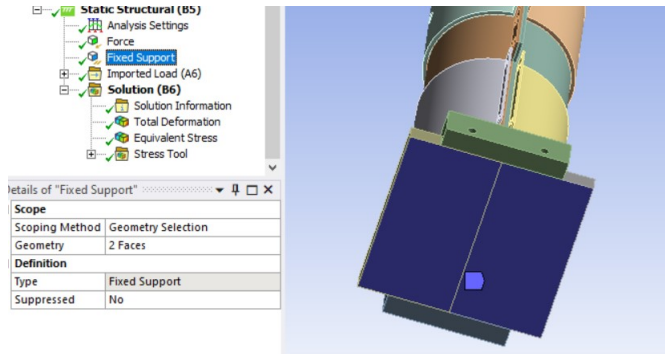
En lo que atañe a el análisis estructural estático se volvió a utilizar la misma configuración de las simulaciones anteriores en cuanto a la geometría. Se implementaron soportes *fixed* en la superficie inferior del molde y se colocó una fuerza hacia abajo de 1 ton en la superficie superior de la pieza compresora. Por último se colocaron los resultados de deformación total y factor de seguridad *stress tool*.

Figura 19: Fuerza ejercida



Fuente: Elaboración propia.

Figura 20: Soporte *fixed*



Fuente: Elaboración propia.

## G. Proceso de manufactura

### 1. Manufactura de la base

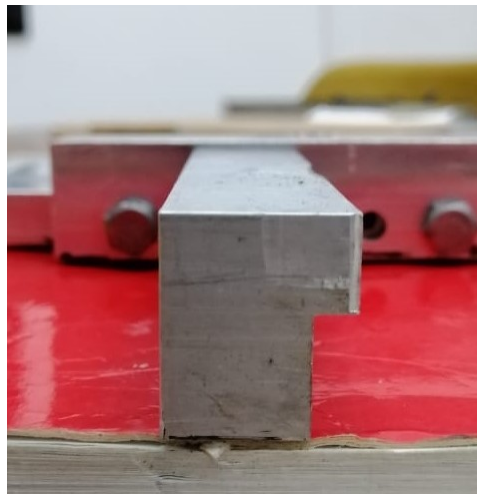
Como se mencionó anteriormente, la base se manufacturó a partir de barras rectangulares de aluminio 6061 de 6ft de largo, 3 in de ancho y 3/4 in de grosor. Debido a que el ecoladrillo a fabricar presenta un diámetro de 4in, fue necesario unir 2 piezas para formar una base de 6 in en total para maquinar la guía del molde. Cada pieza se cortó con un largo de 6 in, de esta forma se tiene una base cuadrada formada por dos piezas. Adicionalmente se cortaron los sujetadores de la base a partir de una barra de 4in de ancho y 1 in de grosor. Se cortaron 2 piezas de aproximadamente 1 in de largo.

Figura 21: Barras de aluminio 6061



Posteriormente, se procedió al fresado de las piezas de aluminio. Para los sujetadores, se desbastó material hasta dejar los sujetadores en forma de "L", en donde la sección más corta se asentaría sobre la superficie del molde como se puede observar en la Figura 22. Por último, se realizaron los agujeros pasados con ayuda del taladro.

Figura 22: Sujetador lateral "L"



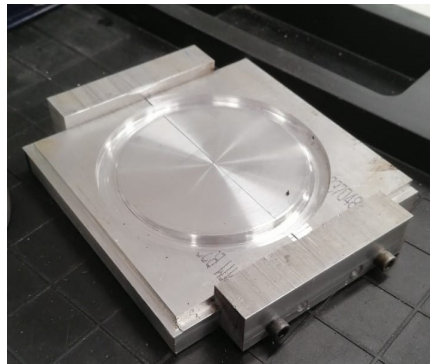
Continuando con las piezas para la base, se desbastó material con la fresadora manual en el borde exterior para realizar una grada, de aproximadamente 5 mm de grosor, en donde asentarían los sujetadores en forma de "L". Cabe mencionar que el fresado no se realizó en uno de los lados más largos de cada pieza, ya que se usará para formar la guía cilíndrica del molde. Después, se realizaron los agujeros roscados para cada pieza del molde, los cuales debían ser concéntricos con los agujeros de los sujetadores.

Figura 23: Fresado de piezas de aluminio



Luego, se colocaron los sujetadores en las piezas de la base y se fijaron con tornillos de 1/4 in. De esta manera se podía tornearse la base para maquinarse la guía del molde, removiendo material a una profundidad de 5 mm, como se observa en la Figura 24. Por último, se procedió a remover el resto de material de la superficie de las piezas del molde hasta la altura del asentamiento o grada de los sujetadores.

Figura 24: Base ensamblada con guía para el molde



Por último, se realizaron los agujeros en la superficie donde asientan los sujetadores de cada pieza, para realizar la respectiva rosca interna de los tornillos que fijarán las cavidades del molde a la base.

## 2. Manufactura de la pieza compresora

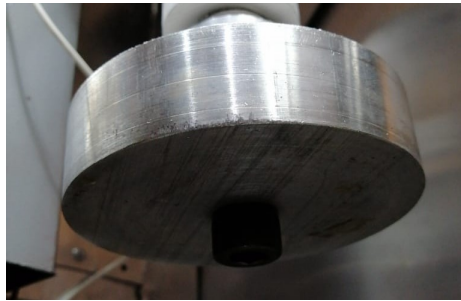
Para la manufactura de la pieza compresora, se utilizó la misma barra de los sujetadores de la base ya que esta es de 4 in de ancho. Se cortó una pieza de 4 in de largo aproximadamente, para tener un bloque cuadrado y tornearlo para fabricar una pieza cilíndrica de diámetro inferior a las 4 in como se puede observar en la siguiente figura.

Figura 25: Manufactura de pieza compresora



Por último, se taladró el agujero pasado de 13 mm para introducir un tornillo allen de 1/2 in.

Figura 26: Pieza compresora



### 3. Manufactura del molde

Para la manufactura del molde, se comenzó cortando una sección de 35 cm aproximadamente, a partir de un tubo de acero A36 de 6 m de largo, diámetro interno de 4 in y un espesor de pared de 1/4 in.

Figura 27: Tubo de acero A36

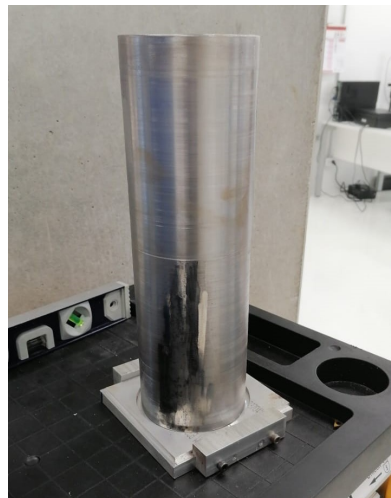


Debido a que el tubo presentaba una capa de óxido, tanto en el interior como en el exterior, y la vena por la soldadura de su fabricación, se procedió a torneado las superficies externa e interna. Adicionalmente, se tornearon las superficies superior e inferior de la sección de tubo cortado para emparejar las caras y dejarlas lo más recto posible. Debido a que la sección del tubo era muy larga y pesada para ser sostenida por sí misma en el torno como si fuera una viga en voladizo, se acopló la base anteriormente maquinada con el molde y se sujetó con el contrapunto del torno, como se muestra en la Figura 28.

Figura 28: Torneado del molde



Figura 29: Ajuste entre la base y el molde posterior al torneado



En la siguiente figura, se muestra una comparación entre un molde oxidado y un molde torneado después de remover la capa de óxido. Es necesario mantener una superficie lisa para evitar adhesión de plástico en el interior del molde y para acoplar adecuadamente las resistencias en el exterior.

Figura 30: Comparación entre molde oxidado y molde torneado



Después de remover el óxido de la superficie del molde, se realizó un ensayo colocando las resistencias en sus respectivos lugares para marcar los puntos donde se puede introducir la termocupla para la medición de temperatura en una región específica. También se dibujaron líneas guía en la longitud del molde para realizar los cortes a la mitad, justo entre las uniones de las resistencias media luna.

Figura 31: Ensayo de resistencias en el molde



Después se procedió a realizar el corte sobre las líneas guía para dividir el molde a la mitad y se taladraron los agujeros para las termocuplas. Cabe añadir que los agujeros para las termocuplas son roscados, ya que esta cuenta con un tornillo de 1/4 in en su extremo para fijarse sobre una superficie. Posteriormente, se debió rectificar la superficie cortada con la fresadora, ya que se presentaron irregularidades a lo largo de la longitud de cada cavidad.

Cabe añadir que, debido a que se pierde material en el corte y el rectificado, al juntar ambas cavidades de nuevo no se forma una circunferencia completa, sino que se forma un contorno ovalado. Debido a esto, se debió torneear nuevamente la guía de la base para reducir su diámetro y casar con ambas cavidades.

Figura 32: Rectificado de cavidades



Como siguiente paso, se soldaron las bisagras a cada cavidad del molde. Se utilizaron bisagras comunes de acero pulido, las cuales se cortaron para reducir su tamaño debido a la limitante de espacio por las resistencias. Cada bisagra extendida mide 3 in de alto y 3 in de ancho, el espacio disponible en el molde es de aproximadamente 2 in. Por lo tanto, se cortó con segueta 1 in de las bisagras, la cual se utilizaría en la parte superior del molde. Se utilizaron en total 2 bisagras de 2 in de alto y 1 bisagra de 1 in de alto. Se procedió a soldar cada parte de las bisagras en cada cavidad del molde, de modo que una mitad de cada bisagra estuviera unida a una parte del molde.

Figura 33: Bisagras del molde



Posteriormente, se fabricaron los sujetadores del molde a la base utilizando una barra plana rectangular, las cuales se doblaron a  $90^\circ$  para tener una superficie paralela a la base, y sobre esa misma se realizó un agujero en el centro para colocar un tornillo de  $1/4$  in.

Figura 34: Sujetadores del molde a la base



Por último, se cortaron dos piezas de la misma barra plana rectangular con la que se fabricaron los sujetadores del molde, para utilizarlas como pestañas de cierre y apriete, por medio de tornillos de 1/4 in, entre las cavidades. Se realizaron dos agujeros a cada una y fueron soldadas en el espacio libre entre las resistencias.

Figura 35: Pestañas de cierre del molde



El proceso de manufactura para cada parte fue repetido de igual manera por segunda vez, ya que se fabricaron 2 moldes completos para la máquina compactadora de plástico.

## H. Pruebas

Posterior a la manufactura el sistema del molde y calentamiento fue puesto a prueba después de ser ensamblado en la máquina compactadora. Se puede observar el protocolo de pruebas en la sección de Anexos en donde se detalla el equipo utilizado, el procedimiento paso a paso a seguir y los parámetros medidos. Adicionalmente, se midió el tiempo que demora el sistema de calentamiento en alcanzar una temperatura límite de 180 °C.

Adicionalmente, se realizó una prueba aumentando la temperatura de compactación a 250°C con los mismos tiempos medidos de compactación.

En lo que atañe al diseño final, el molde cuenta con un diseño cilíndrico de diámetro de 4 in (101.6 mm) y altura de 35 cm, formado por dos cavidades independientes que se acoplan a una base rectangular de 6 in x 6 in, por medio de una guía circular en su centro. En cuanto al sistema de calentamiento, se utilizaron 4 resistencias media luna de 100mm de alto, 300 W y 120 voltios cada una, las cuales abrazan a las cavidades por la superficie exterior y se sujetan por medio de tornillos de 1/4 in en los agujeros centrales de cada una. A excepción de una resistencia que se sujeta con la misma termocupla, para la medición de temperatura.

En cuanto al proceso de manufactura, en la imagen que se muestra a continuación, se puede observar el resultado final de la fabricación del sistema del molde y calentamiento.

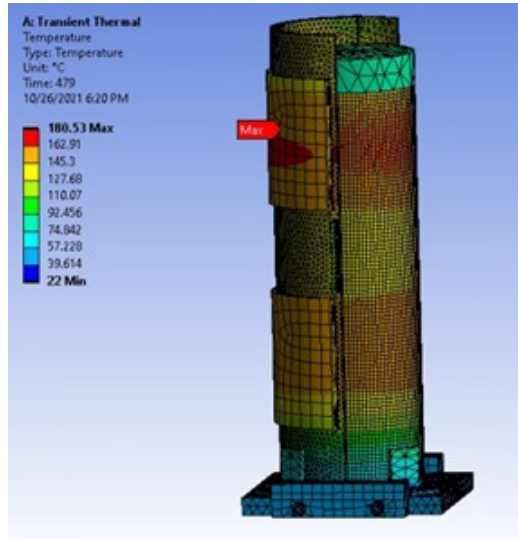
Figura 36: Sistema de molde y calentamiento



## 1. Resultados de simulación térmica transitoria

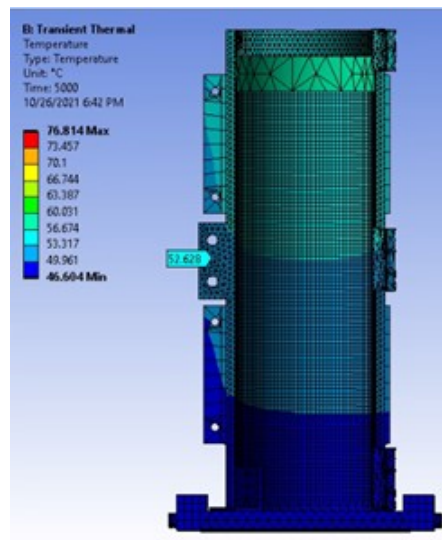
Cabe añadir que, ANSYS tiene la limitante de realizar la simulación a partir de un tiempo de corrida proporcionado por el usuario, no es posible asignar una temperatura máxima que la finalice. Es por ello que los resultados no muestran una temperatura máxima exacta de 180 °C. A continuación, en las figuras 37 y 38 se pueden observar las simulaciones del tiempo de calentamiento y enfriamiento del molde.

Figura 37: Simulación 1: Tiempo de calentamiento



Fuente: Elaboración propia.

Figura 38: Simulación 2: Tiempo de enfriamiento

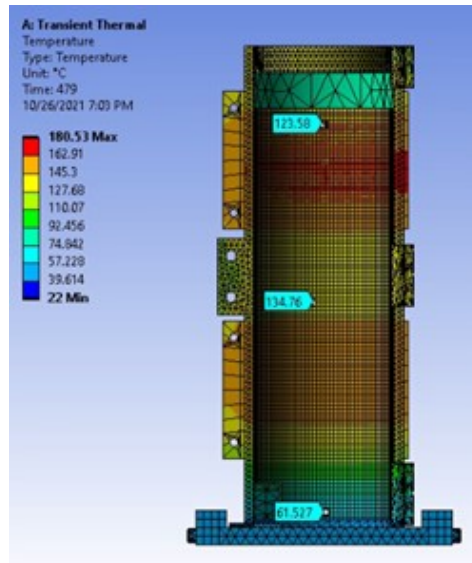


Fuente: Elaboración propia.

Según las simulaciones, tardaría 479 segundos (7.98 min) en alcanzar la temperatura límite y 5000 segundos (83.33 min) en disminuir su temperatura para su manipulación.

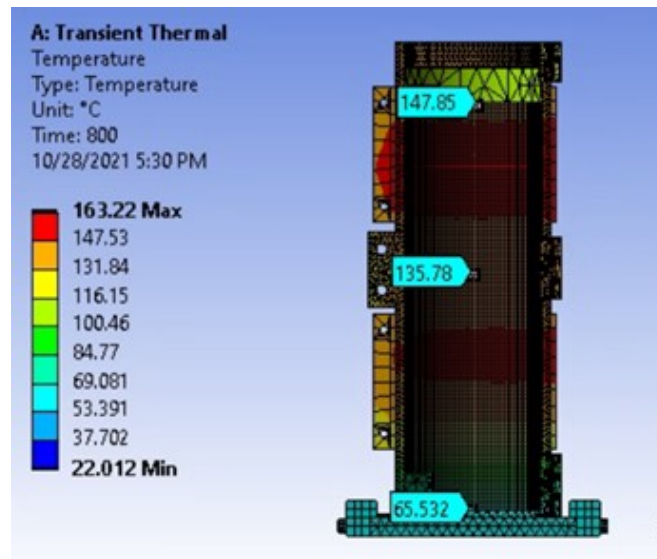
Adicionalmente, se realizaron simulaciones variando la potencia de las resistencias para validar la selección intermedia al inicio de los cálculos. Se simuló cómo se transfiere el calor a lo largo del molde para observar qué tan uniforme es la temperatura en el mismo. Se pueden observar las diferencias de temperaturas en los puntos inferior, medio y superior del molde a una potencia de 300 W, 250 W y 500 W.

Figura 39: Simulación 3: Distribución de temperatura con 300 W



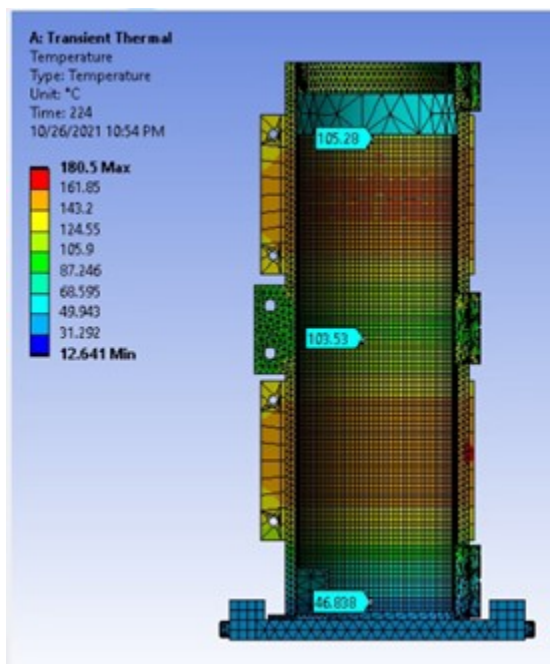
Fuente: Elaboración propia.

Figura 40: Simulación 4: Distribución de temperatura con 250 W



Fuente: Elaboración propia.

Figura 41: Simulación 5: Distribución de temperatura con 500 W



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestran las variaciones de temperatura y tiempo entre las simulaciones, cuando la potencia es menor a los 300 W y cuando es mayor a los 300, respectivamente.

Cuadro 6: Variación de temperatura entre 300 W y 250 W

	300 W	250 W	Variación porcentual
<b>Temperatura punto superior</b>	123.58 °C	147.85 °C	19.64 %
<b>Temperatura punto medio</b>	134.76 °C	135.78 °C	0.76 %
<b>Temperatura punto inferior</b>	61.53 °C	65.5 °C	6.45 %

Cuadro 7: Variación de tiempo entre 300 W y 250 W

<b>Tiempo 300 W</b>	479 s.
<b>Tiempo 250 W</b>	800 s.
<b>Variación porcentual</b>	67 %

Cuadro 8: Variación de temperatura 300 W y 500 W

	300 W	500 W	Variación Porcentual
<b>Temperatura punto superior</b>	123.58 °C	105.28 °C	-14.84 %
<b>Temperatura punto medio</b>	134.76 °C	103.53 °C	-23.17 %
<b>Temperatura punto inferior</b>	61.53 °C	46.84 °C	-23.87 %

Cuadro 9: Variación de tiempo entre 300 W y 500 W

<b>Tiempo 300 W</b>	479 s.
<b>Tiempo 500 W</b>	224 s.
<b>Variación porcentual</b>	-53 %

Con base en las pruebas, se midió el tiempo real que tarda el sistema de calentamiento en alcanzar la temperatura de 180 °C aproximadamente, como se puede mostrar a continuación:

Cuadro 10: Tiempo necesario para alcanzar una temperatura de 180 °C

Prueba	Tiempo (seg)
1	848
2	791
3	812
4	833
5	789
<b>Pomedio</b>	<b>815</b>

Comparando con el tiempo estimado según la simulación, el tiempo real para alcanzar una temperatura de 180 °C es 70.15 % mayor.

Por último, se midió el tiempo real que tarda el sistema de calentamiento en alcanzar la temperatura de 45 °C aproximadamente para la manipulación segura, como se puede mostrar a continuación:

Cuadro 11: Tiempo necesario para alcanzar una temperatura de 45 °C

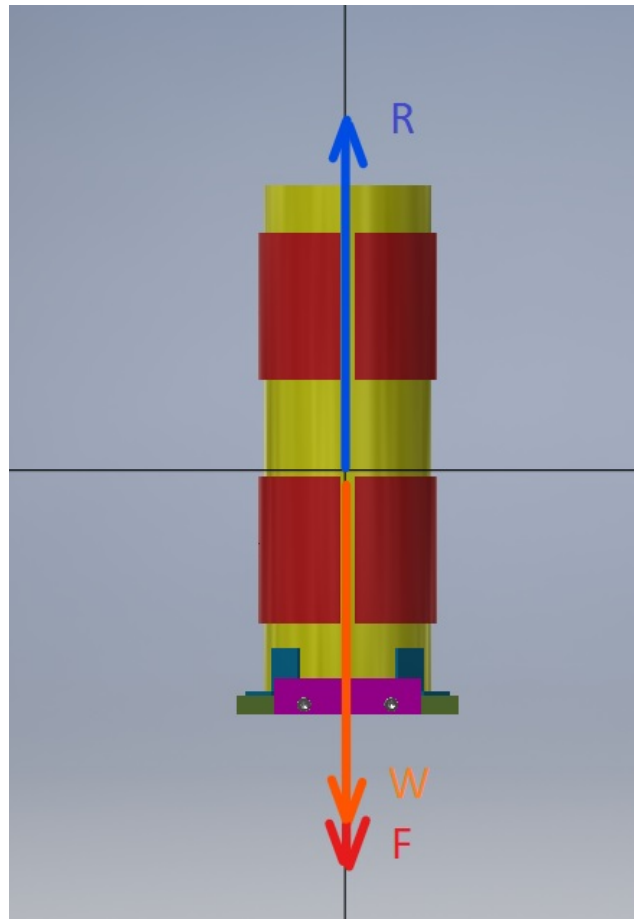
Prueba	Tiempo (min)
1	88
2	96
3	82
4	93
5	93
<b>Pomedio</b>	<b>90</b>

Comparando con el tiempo estimado según la simulación, el tiempo real para alcanzar una temperatura de 180 °C es 7.41 % mayor.

## 2. Resultados de simulación estructural estática

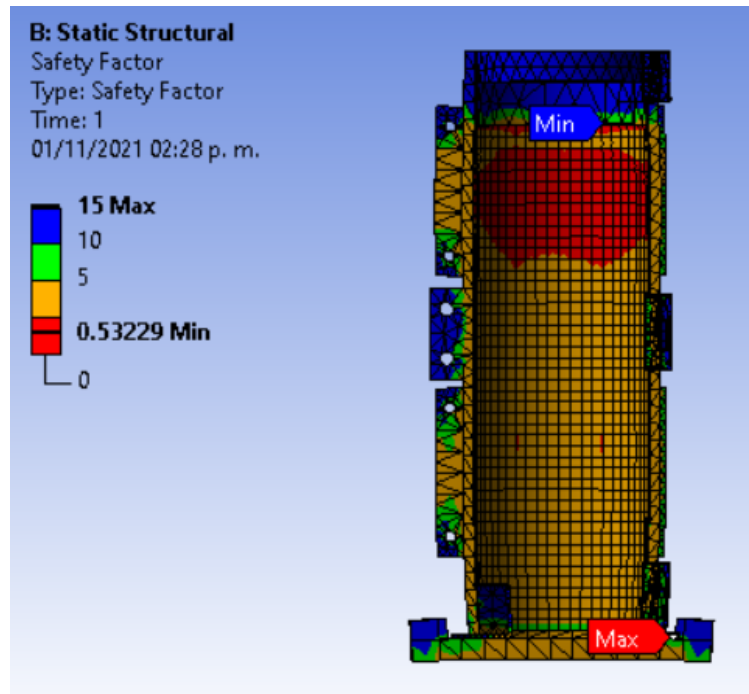
Por otro lado, para la simulación estructural, utilizando los resultados de temperatura de las simulaciones anteriores, se determinó el factor de seguridad del molde ante la fuerza ejercida para la compactación. Para el análisis estructural, se utilizó una fuerza  $F$  1 tonelada (9807 N) proporcionada por el sistema de compresión de la máquina y el peso del molde ( $W = 7.44 \text{ kg} * 9.81 \text{ m/s}^2 = 72.9 \text{ N}$ ), como se puede observar en el diagrama de cuerpo libre. De esta forma se aseguró que el diseño resistiría cualquier esfuerzo de compresión.

Figura 42: Diagrama de cuerpo libre del molde



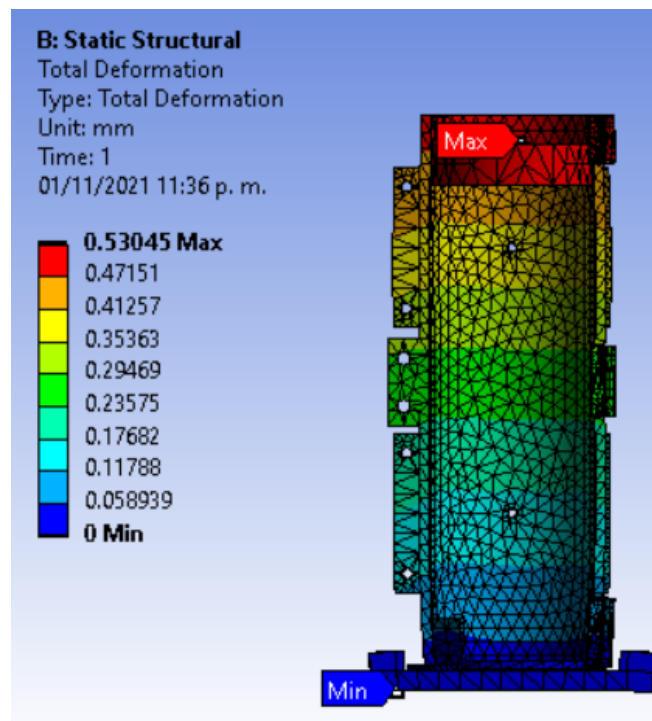
Fuente: Elaboración propia.

Figura 43: Simulación 6: Factor de seguridad



Fuente: Elaboración propia.

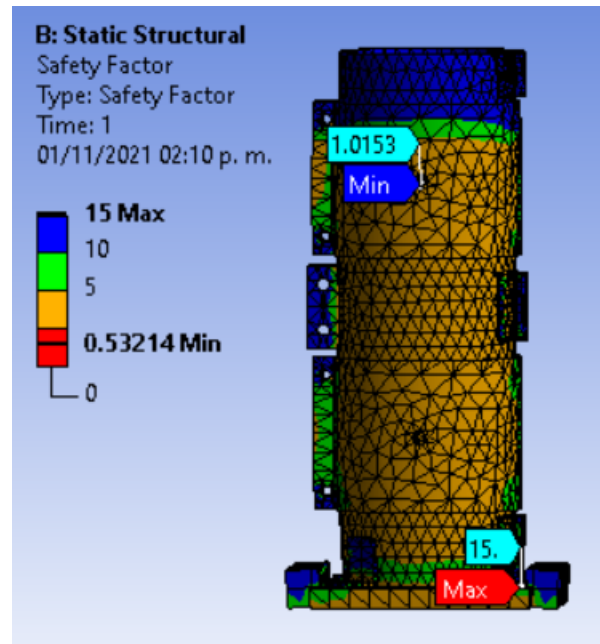
Figura 44: Simulación 6: Deformación total



Fuente: Elaboración propia.

Según la simulación, se observa que el factor de seguridad en el molde es superior a 1. Mientras que para el plástico si presenta un factor inferior a 1, ya que se espera que el plástico se deforme. En el molde, el factor mínimo es de 1.01 y se encuentra en un agujero superior para la sujeción de la resistencia eléctrica. Y el factor máximo es de 15 y se encuentra en la superficie de la base, como se muestra a continuación. Además, según el análisis, el molde tiene una deformación total máxima de 0.53 mm en la pieza compresora y en la bisagra superior.

Figura 45: Factor de seguridad mínimo y máximo del molde



Fuente: Elaboración propia.

---

### Discusión de resultados

---

En lo que atañe al molde, gracias a su diseño y el material seleccionado (Acero A36), soportó la fuerza ejercida de 1 ton en la compresión, como se pudo observar en la simulación 6 en las figuras 17 y 18. El molde no se deforma considerablemente ya que la deformación total máxima fue de 0.53 mm según la simulación estructural. La fuerza ejercida en el molde es absorbida por el plástico, el cual se deforma y trata de expandirse dentro de la cavidad.

Por otro lado, ya que el molde está formado por 2 cavidades independientes que están unidos por medio de bisagras, es capaz de abrirse por la mitad para extraer el ecoladrillo compactado. Además, gracias a las pestañas del diseño, es capaz de mantenerse cerrado durante la operación.

En cuanto a las cavidades del molde, ambas partes se alinean con ayuda de la guía circular de la base para encerrar completamente la cavidad cilíndrica en el interior. También se debe tomar en cuenta la pieza compresora, la cual encierra a la cavidad por la parte superior del molde.

El molde presenta un alto de 35 cm y un diámetro interno de 4 in (101.6 mm), las cuales son dimensiones máximas de una botella PET de 2L. Además, debido a que el molde tiene una masa de 7.44 kg (16.4 lb), puede ser manipulado por una persona con ambas manos ya que no supera el peso

En cuanto al sistema de calentamiento, las resistencias eléctricas se fijan al molde por medio de tornillos, los cuales pueden removerse del molde fácilmente. Además, ya que las resistencias incluyen cables de conexión, estas pueden conectarse sin esfuerzo al sistema eléctrico.

En general, tanto las partes del molde y del sistema de calentamiento, permanecen unidas mediante uniones por torillos; y la pieza compresora crea la relación con el sistema de

compresión.

Por otro lado, para el análisis del uso de potencias superior e inferior a 300 W, se puede observar que, con una potencia de 500 W, el tiempo para alcanzar la temperatura límite disminuye en un 53 %, pero las temperaturas en los tres puntos del molde son menores que las temperaturas a 300 W; 14.81 %, 23.17 % y 23.87 %, respectivamente. Y con una potencia de 250 W, el efecto es contrario, el tiempo para alcanzar la temperatura límite aumenta un 67 %, y las temperaturas en los tres puntos del molde son mayores que las temperaturas a 300 W; 19.64 %, 0.76 % y 6.45 %, respectivamente. Es por ello que se buscó un punto intermedio entre el tiempo y la distribución de temperaturas a lo largo del molde para balancear el efecto de estas variables.

En cuanto al tiempo que demora el sistema del molde y calentamiento en alcanzar una temperatura de 180 °C, se puede observar en el cuadro 9 que los tiempos medidos fueron mayores que el tiempo estimado en la simulación 1 de 479 segundos. Mientras que, el tiempo real promedio fue de 815 segundos (13.58 minutos), 70.15 % mayor a lo esperado.

La posible fuente de error es el sistema de control implementado en el sistema eléctrico para controlar las resistencias. La simulación no toma en cuenta las variables del sistema de control para la entrada de calor, ya que el sistema eléctrico utiliza un controlador PID de temperatura. Se observó que, mientras la temperatura se acercaba cada vez más a la temperatura límite, tardaba más tiempo en aumentar de valor que al principio cuando estaba a temperatura ambiente.

Por otro lado, con ayuda de un multímetro, se midió el ohmiaje de cada resistencia eléctrica para determinar la potencia real de cada una. Con una tensión de 120 voltios y empleando la ley de Ohm, se obtuvo la siguiente cuadro:

Cuadro 12: Variación de potencia en resistencias electricas

Resistencia eléctrica	Ohm ( $\Omega$ )	Potencia (W)
1	49.7	289.74
2	50.3	286.28
3	51	282.35
4	47.7	301.89
5	46.5	309.68
6	53	271.7
7	488	295.08
8	47.6	302.52

Se puede observar que no todas las resistencias eléctricas cuentan con una potencia de 300 W, solamente las resistencias 4, 5 y 8, el resto se encuentra por debajo del valor esperado. Como se mencionó anteriormente, a menor potencia, mayor será el tiempo que demorará el sistema en alcanzar una temperatura límite.

Por el contrario, en cuanto al tiempo que tarda el sistema en alcanzar una temperatura de 45 °C aproximadamente para la manipulación, según la simulación 2 tardaría 5000 segundos (83.33 minutos). Mientras que el tiempo real promedio fue de 90 minutos (5400 segundos), el cual es un 7.41 % mayor que lo esperado.

En cuanto a la fabricación del ecoladrillo, utilizando la temperatura límite de 180 °C, se logró compactar el plástico a la forma esperada, mas no a la calidad deseada ya que no todo el plástico logró adherirse entre sí. Por lo tanto, se debe utilizar una temperatura superior a 180 °C para lograr fabricar un ecoladrillo uniforme y completamente compactado.

Figura 46: Ecoladrillo formado a 180 °C



Por último, en cuanto a la prueba de la compactación a 250 °C, se logró formar un ecoladrillo completo, pero al superar la temperatura de fusión del plástico, este llegó a fundirse en algunas secciones, como se muestra a continuación.

Figura 47: Ecoladrillo formado a 250 °C



Como se pudo observar anteriormente, el diseño y la manufactura del molde fue un éxito, ya que ayudó a moldear al plástico a la forma que tiene en sus cavidades. Gracias a los materiales, soportó una alta temperatura y una fuerza de compresión de 1 ton sin sufrir alguna deformación significativa. Además, soportó la expansión del plástico en el interior durante la operación ya que no se abrió por la presión generada. Por otro lado, el sistema eléctrico se acopló adecuadamente a la superficie del molde gracias al diseño de la media luna. Además, el sistema eléctrico funcionó correctamente ya que todas las resistencias calentaron durante la operación..

Los ecoladrillos obtenidos a una temperatura de 180 °C no podrían sustituir un ecoladrillo convencional, ya que no están unidos en su totalidad. Ante un esfuerzo leve, el ecoladrillo compactado puede desarmarse por secciones. Además, no sería capaz de utilizarse de forma horizontal porque se rompería en secciones pequeñas de plástico compactado. Pero, si la temperatura aumenta por encima de los 180 °C, se logra una mejor adhesión entre el plástico, haciendolo un producto más rígido que no se desarmaría en pequeñas secciones. Pero se corre el riesgo que el plástico se funda o incluso se queme. Se deben realizar pruebas a distintas temperaturas entre 180 °C y 250 °C para determinar qué valor sería el adecuado para lograr una adhesión completa en todo el ecoladrillo.

1. Se logró diseñar, analizar y manufacturar un sistema de calentamiento para la compactación de residuos de botellas PET, el cual se acopló con sus componentes al molde diseñado del ecoladrillo.
2. Según las pruebas realizadas y los resultados obtenidos, la temperatura para compactar el plástico en el sistema del molde y calentamiento debe ser cercana a los  $250^{\circ}\text{C}$ , en el cual, el plástico se adhiere entre sí, pero éste se funde parcialmente.
3. Con base en los cálculos realizados, se pudo seleccionar un sistema de calentamiento compuesto por 4 resistencias media luna de 120 voltios y 300W de potencia para llevar a cabo el calentamiento adecuado del molde.
4. El sistema de calentamiento conformado por las resistencias eléctricas media luna fue ensamblado exitosamente en las cavidades del molde, por medio de tornillos en el agujero central de cada resistencia. La unión temporal mantiene a las resistencias fijas en su lugar y en contacto con la superficie exterior de las cavidades.
5. Se logró diseñar y manufacturar un molde, con sus respectivas cavidades y su base utilizando materiales comunes en el mercado local. El diseño puede consultarse en el juego de planos en el anexo de "Planos de construcción".



---

### Recomendaciones

---

Para la manufactura del molde, se recomienda formar las cavidades a partir de una plancha de acero plana, la cual podría doblarse de forma circular para formar una circunferencia perfecta. Ya que, al cortar el tubo a la mitad, se pierde material por el corte y la rectificación de la superficie, dando como resultado una sección ovalada. Esto afecta directamente en la guía circular de la base, ya que debe de maquinarse nuevamente para adaptarlo a las cavidades.

Durante las pruebas, se observó que el sistema del molde y calentamiento al no estar fijo a la estructura, durante la operación éste se tambaleó ligeramente, interfiriendo con la carrera de la pieza compresora con la superficie interna del molde. Se debería sujetar la base a la estructura y realizar una alineación previa con el sistema de compresión, para evitar desplazamientos indeseados durante la compactación.

Se pueden realizar pruebas con temperaturas entre 180 °C y 250 °C para determinar qué temperatura es la ideal para adherir por completo el plástico sin fundirlo.

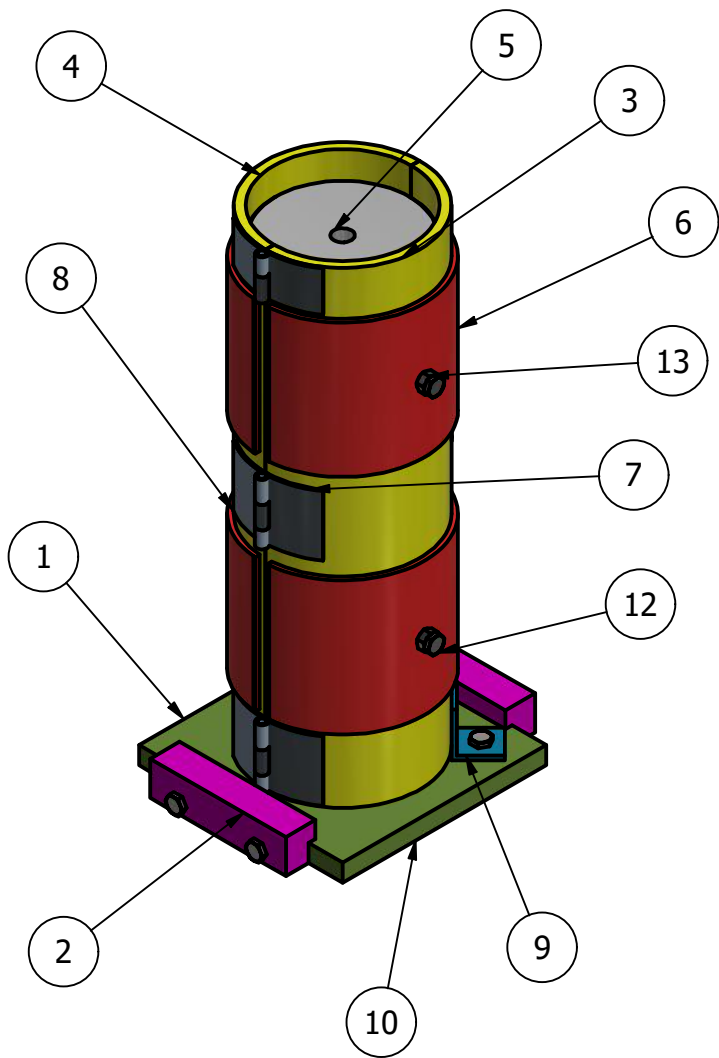
Replicar el experimento para otros tipos de plásticos para verificar que el sistema del molde y calentamiento es funcional para compactar cualquier plástico a reciclar.



- Beltrán Rico, M., Marcilla Gomis, A., Marcilla Gomis, A. & Digitalia, I. (2012). *Tecnologâia de polâimeros: procesado y propiedades* [OCLC: 1026913578]. Publicaciones de la Universidad de Alicante.
- Çengel, Y. A. & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y de masa: fundamentos y aplicaciones* [OCLC: 810110391]. McGraw Hill.
- Drozda, T. J. & Society of Manufacturing Engineers (Eds.). (1996). *Tool and manufacturing engineers handbook: a reference book for manufacturing engineers, managers, and technicians. Vol. 8: Plastic part manufacturing* (4. ed) [OCLC: 832369618]. Society of Manufacturing Engineers.
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems* (3rd ed). J. Wiley & Sons.
- Kuznetsov, M. (1967). *Fundamentos de Electrotecnia* (2da edición). Editorial MIR.
- Rosato, D. V., Rosato, D. V. & Rosato, M. V. (2004). *Plastic product material and process selection handbook* [OCLC: ocm54373102]. Elsevier.
- Sánchez, D. I. M. & Torres, M. H. (2014). *Configuración de moldes, matrices y cabezas de equipos para la transformación de polímeros. QUIT0209* [Google-Books-ID: jif9AwAAQBAJ]. IC Editorial.



**A. Planos de construcción**



LISTADO DE PARTES			
PARTE	CANTIDAD	NÚMERO DE PARTE	DESCRIPCIÓN
1	1	Base aluminio A	Aluminio 6061
2	2	Unión de base	Aluminio 6061
3	1	Cavidad de molde A	Acero A36
4	1	Cavidad de molde B	Acero A36
5	1	Compresor aluminio	Aluminio 6061
6	4	Resistencia media luna	Resistencia abrazadera de mica
7	3	Bisagra 1A	
8	3	Bisagra 1B	
9	2	Sujetador de molde	Acero A36
10	1	Base aluminio B	Aluminio 6061
11	8	ANSI B18.2.1 - 1/4-20 UNC - 0.5	Tornillo hexagonal
12	4	ANSI B18.2.1 - 1/4-20 UNC - 0.625	Tornillo hexagonal
13	6	AS 2465 - 1/4 UNC	Tuerca hexagonal

TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.

TOLERANCIAS GENERALES  
 LINEAL .X ±  
 .XX ±  
 .XXX ±  
 ANGULAR ±  
 FRACCIONES ±  
 RUGOSIDAD SUPERFICIAL n/a/√

DIBUJADO POR Juan Diego Girón FECHA 12/07/2021

DISEÑADO POR Juan Diego Girón FECHA 25/09/2021

REVISADO POR Andrés Viau FECHA 09/01/2022

APROBADO POR Andrés Viau FECHA

NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO Sistema de Molde y Calentamiento

TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III  
 Guatemala, Guatemala 01015  
 PBX: (502) 2634-0336 / 40  
 info@uvg.edu.gt

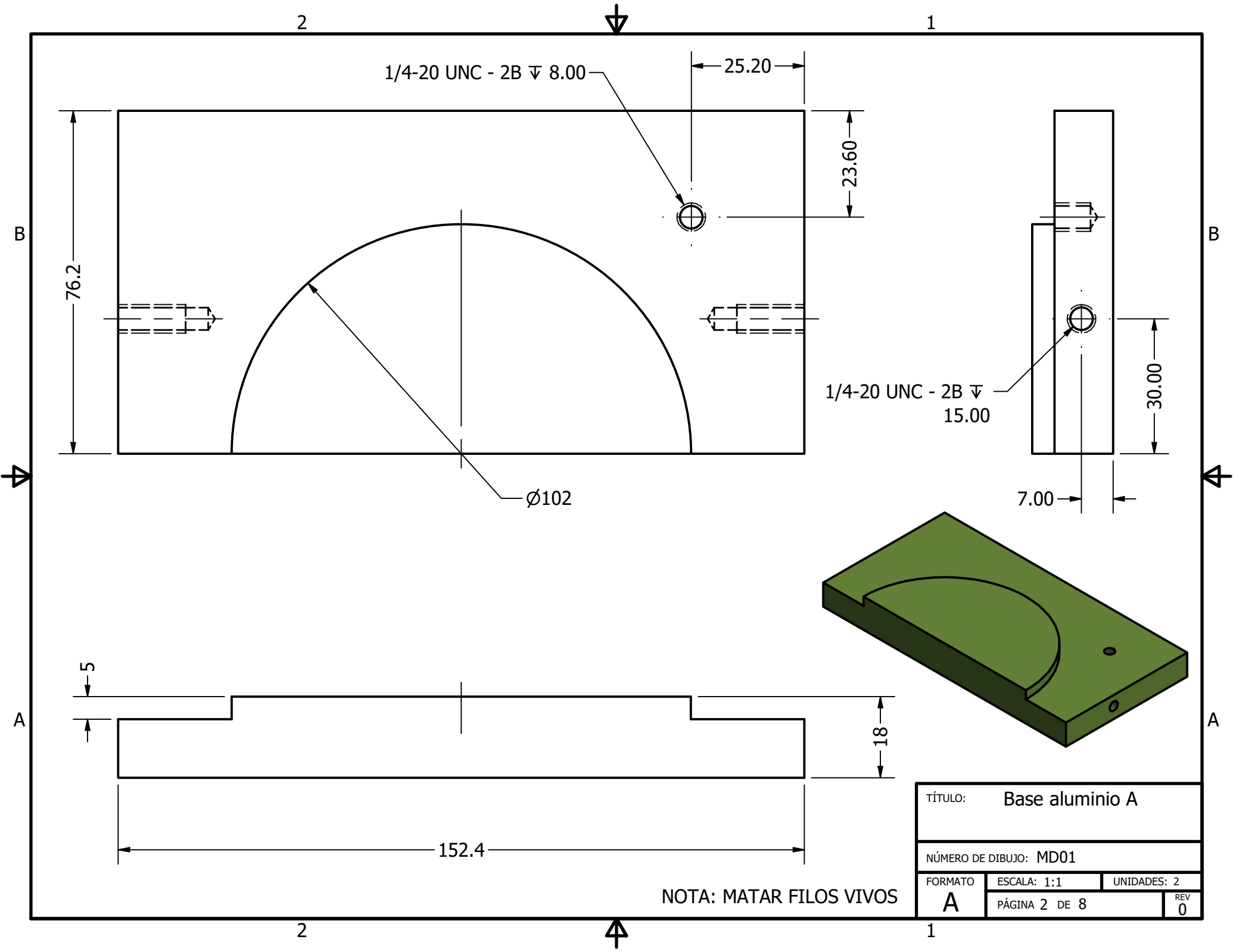
TÍTULO: Molde de ecoladrillo

NÚMERO DE DIBUJO: MD01

FORMATO A ESCALA: 1 : 4 UNIDADES: mm  
 PÁGINA 1 DE 8 REV 0

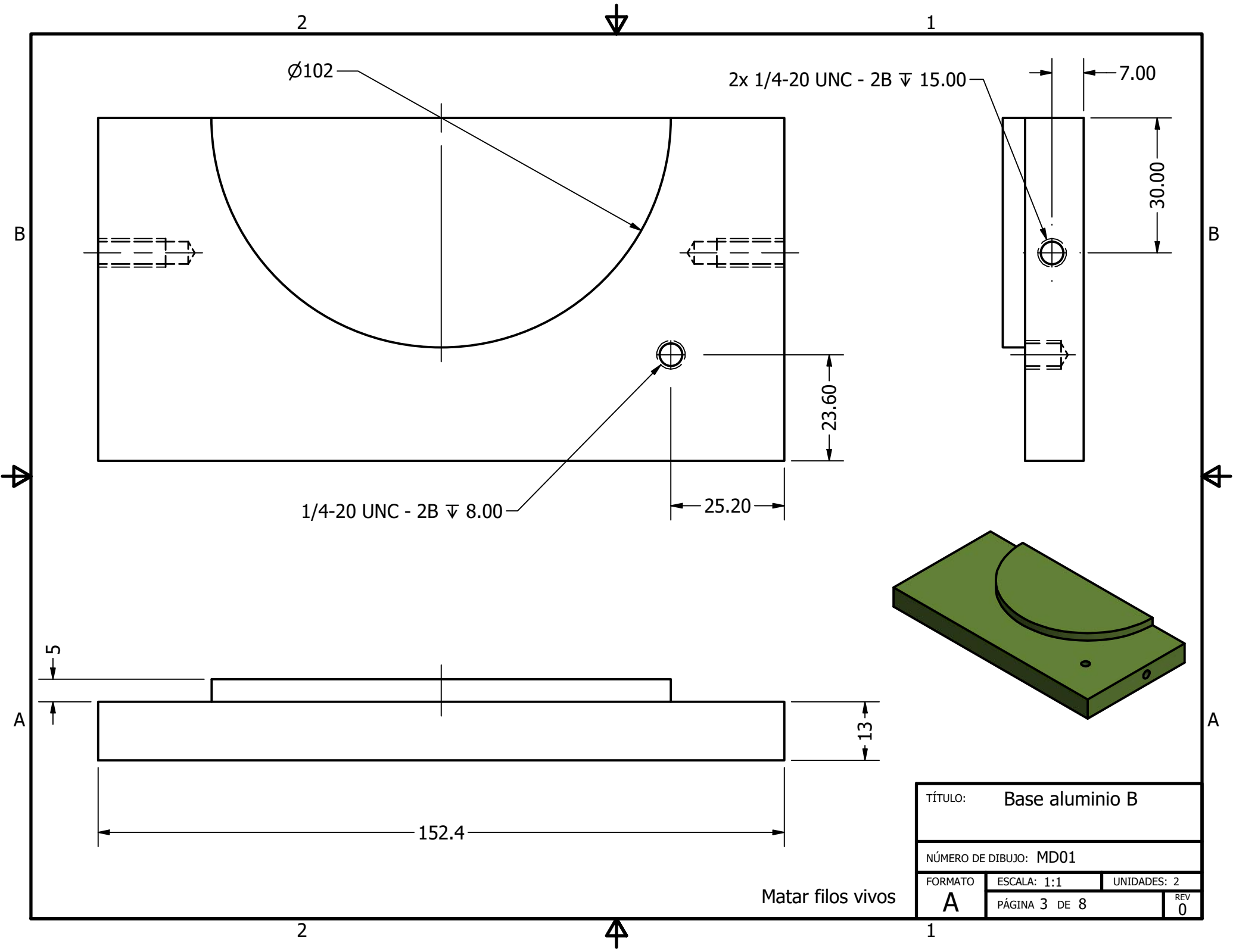
MATERIAL Ver listado  
 TRATAMIENTO n/a  
 MASA: N/A





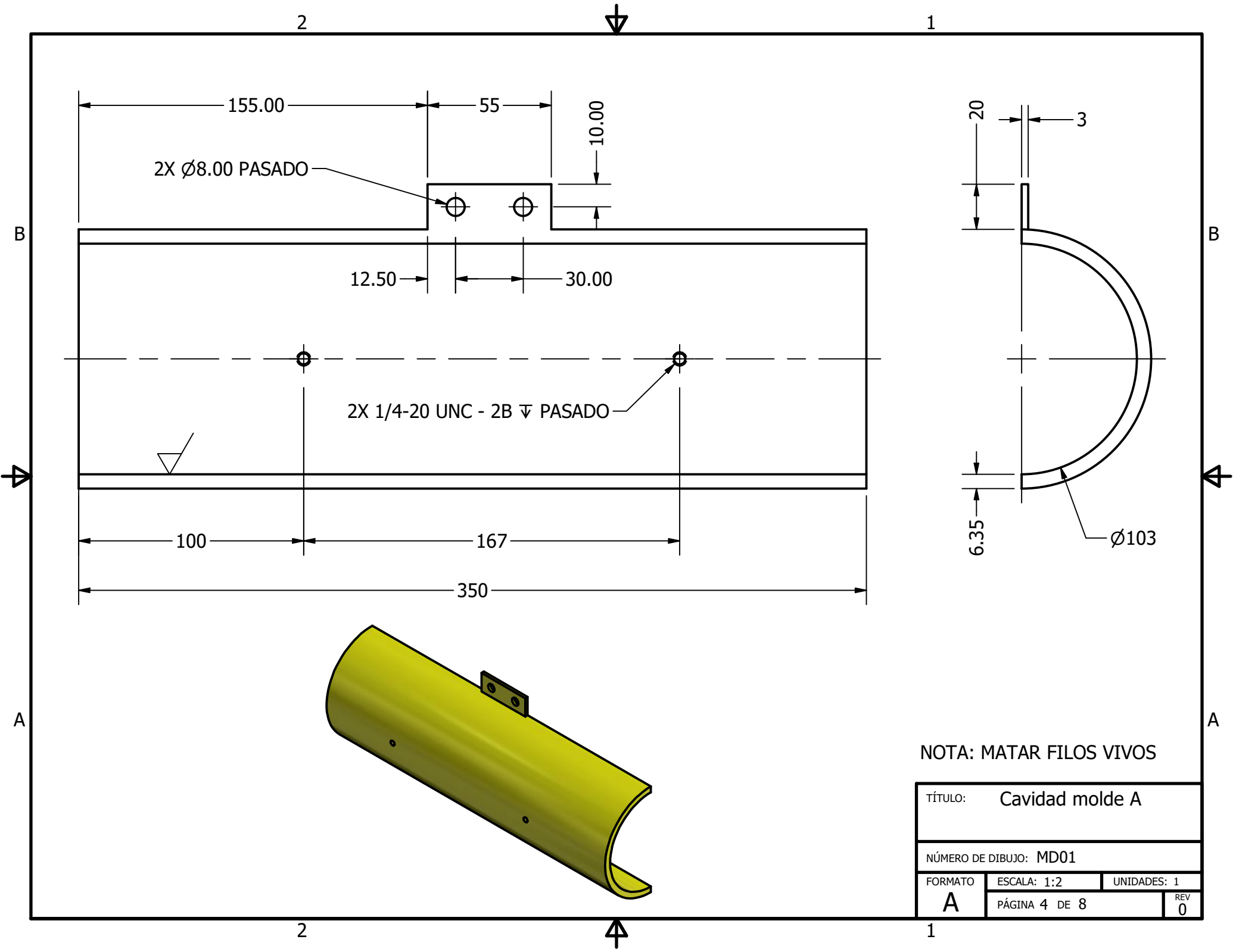
NOTA: MATAR FILOS VIVOS

TÍTULO: Base aluminio A		
NÚMERO DE DIBUJO: MD01		
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: 2
<b>A</b>	PÁGINA 2 DE 8	REV 0



TÍTULO: Base aluminio B		
NÚMERO DE DIBUJO: MD01		
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: 2
A	PÁGINA 3 DE 8	REV 0

Matar fillos vivos

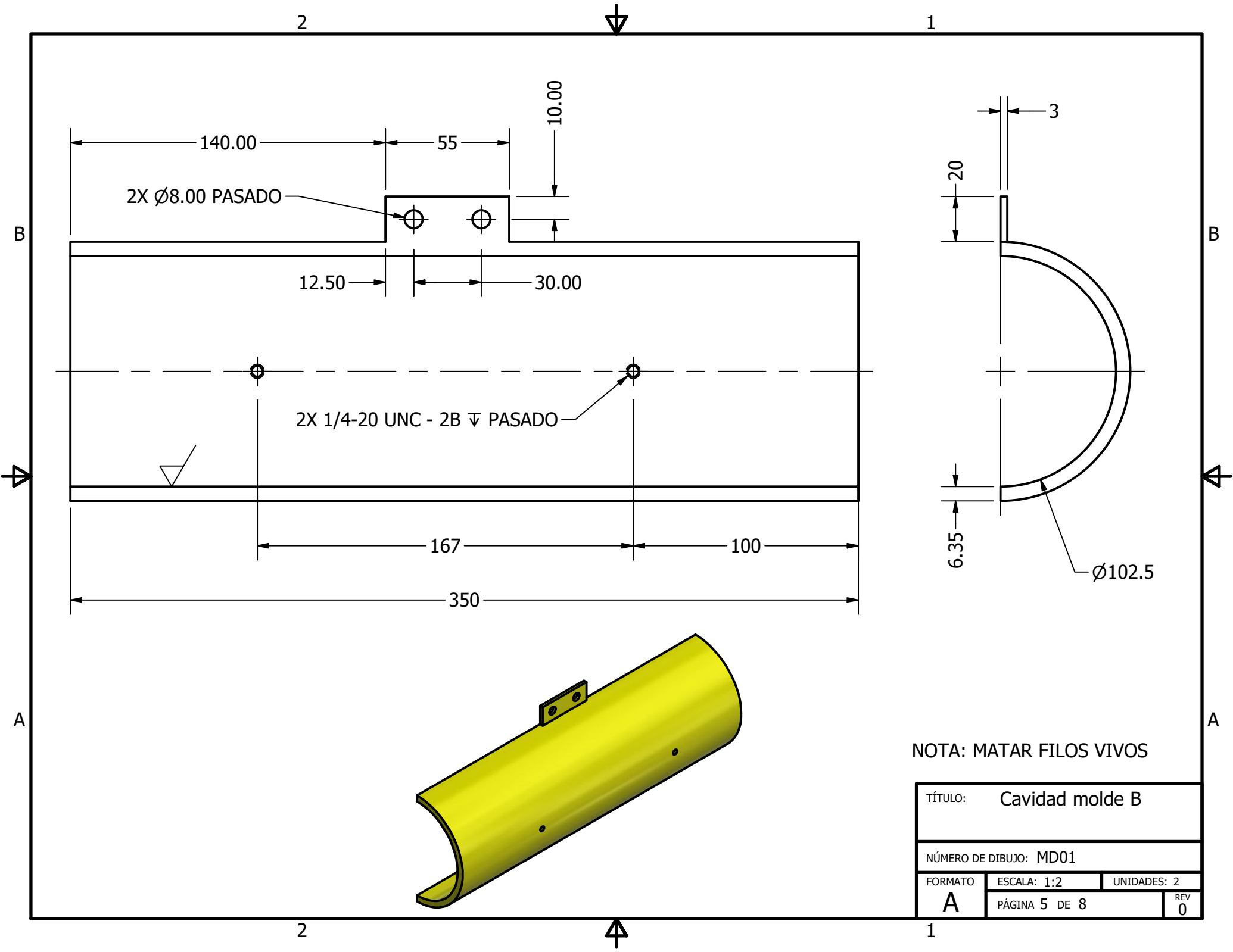


2X Ø8.00 PASADO

2X 1/4-20 UNC - 2B ▽ PASADO

NOTA: MATAR FILOS VIVOS

TÍTULO: Cavidad molde A		
NÚMERO DE DIBUJO: MD01		
FORMATO	ESCALA: 1:2	UNIDADES: 1
<b>A</b>	PÁGINA 4 DE 8	REV 0



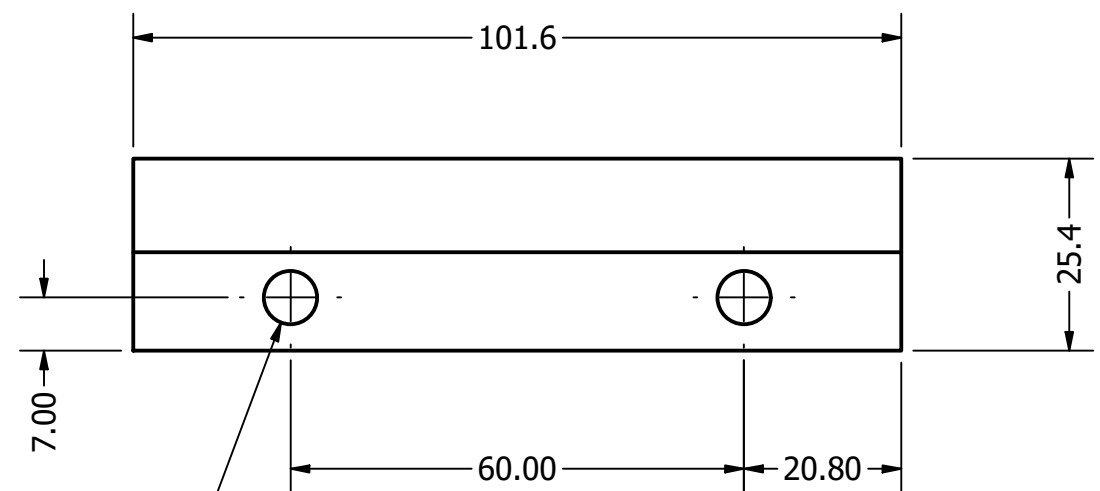
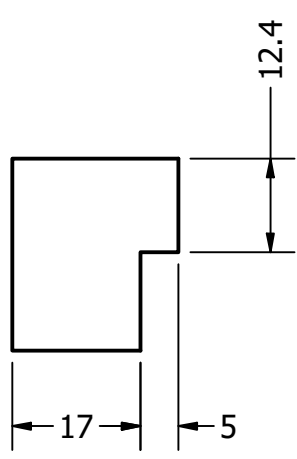
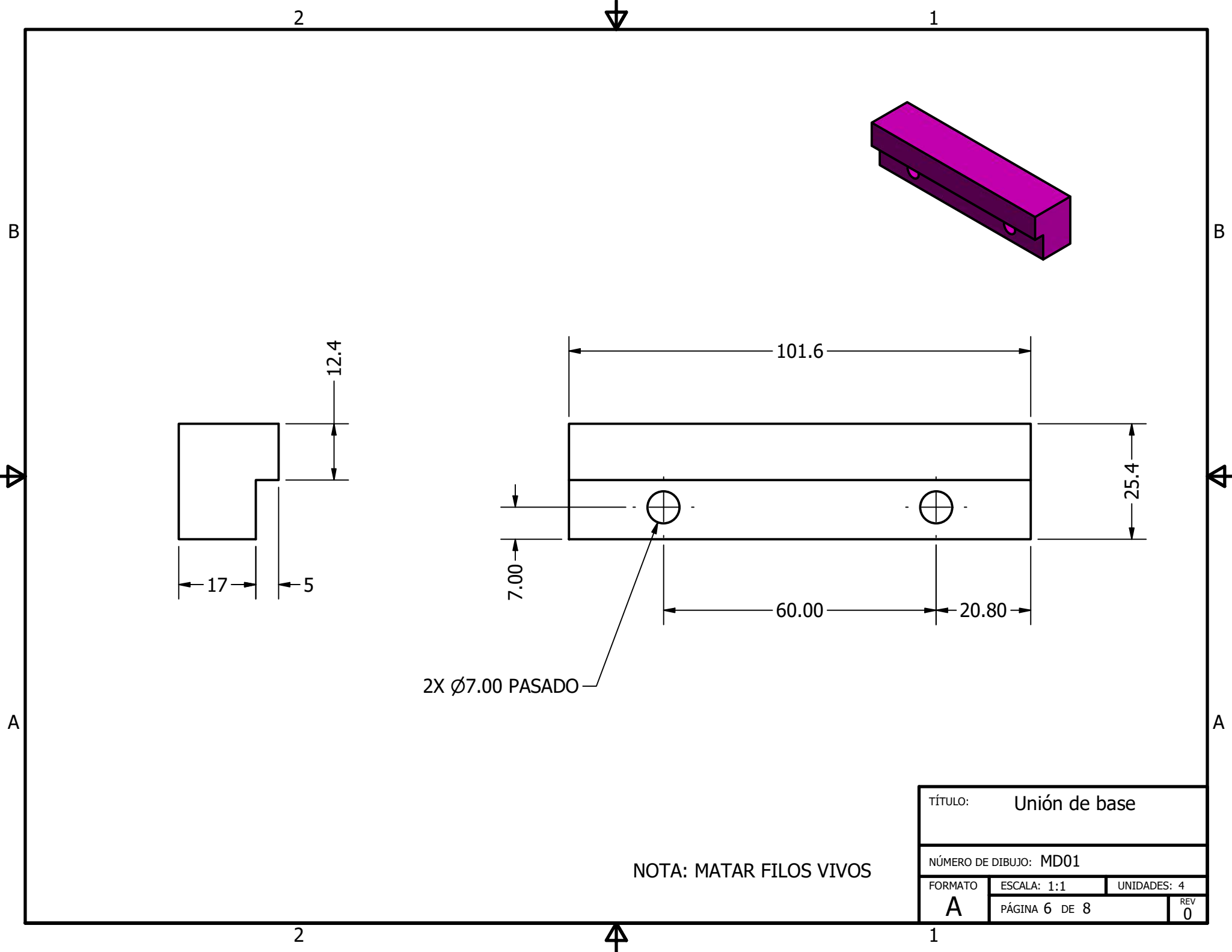
2X Ø8.00 PASADO

2X 1/4-20 UNC - 2B ▽ PASADO

Ø102.5

NOTA: MATAR FILOS VIVOS

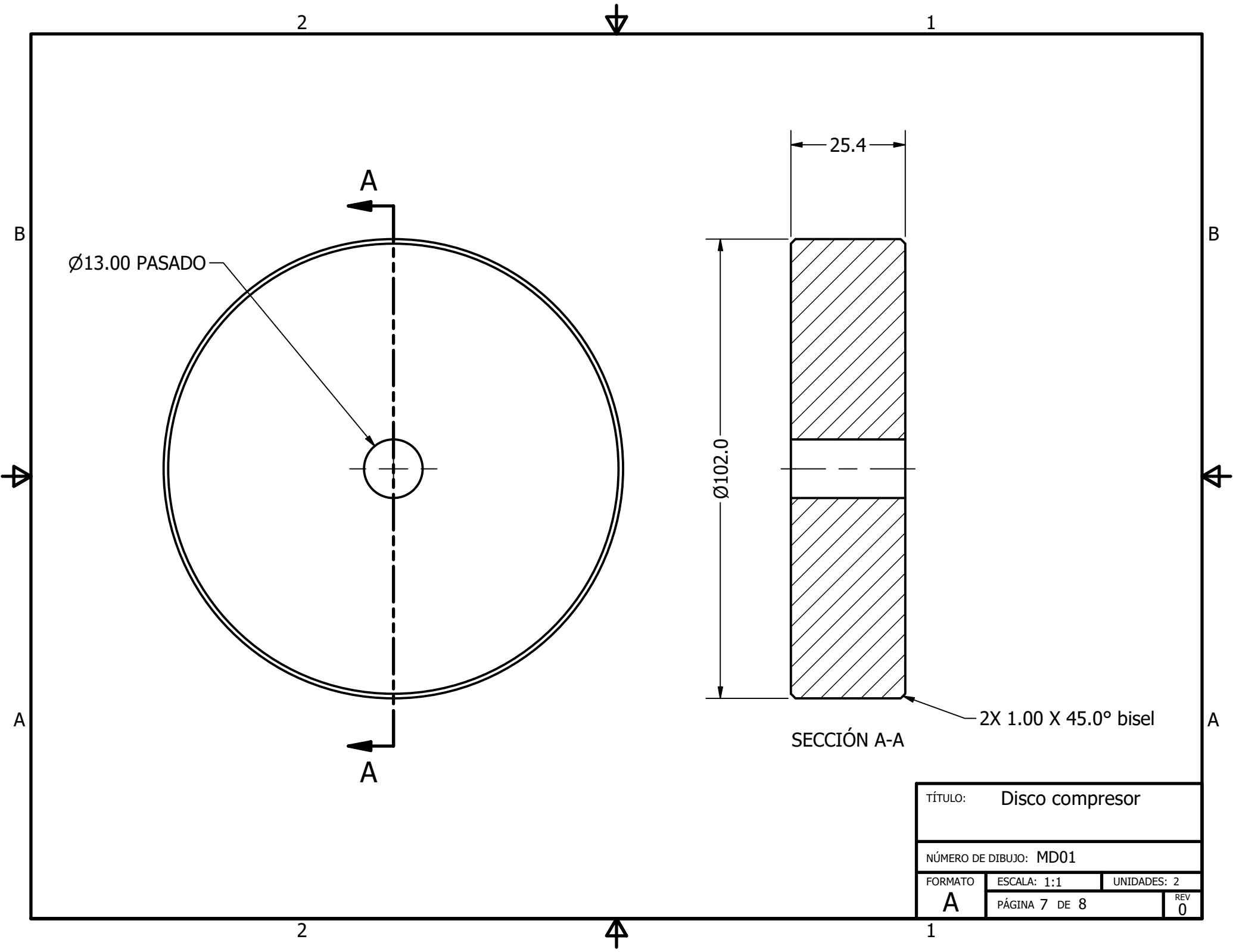
TÍTULO: Cavity molde B		
NÚMERO DE DIBUJO: MD01		
FORMATO	ESCALA: 1:2	UNIDADES: 2
<b>A</b>	PÁGINA 5 DE 8	REV 0



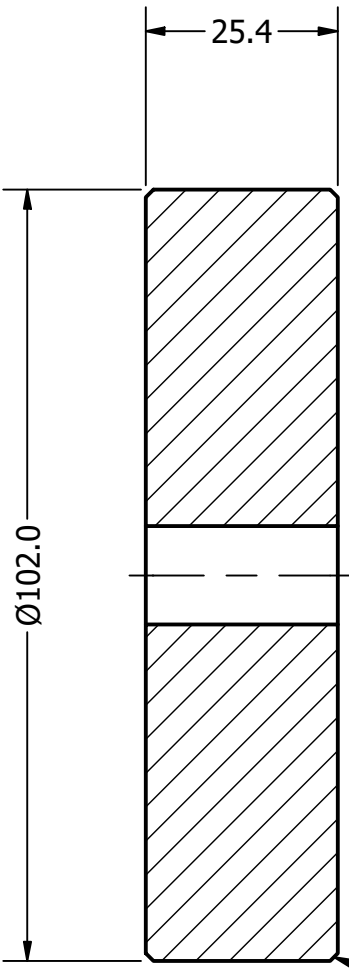
2X Ø7.00 PASADO

NOTA: MATAR FILOS VIVOS

TÍTULO:		Unión de base	
NÚMERO DE DIBUJO: MD01			
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: 4	
<b>A</b>	PÁGINA 6 DE 8		REV 0



Ø13.00 PASADO



SECCIÓN A-A

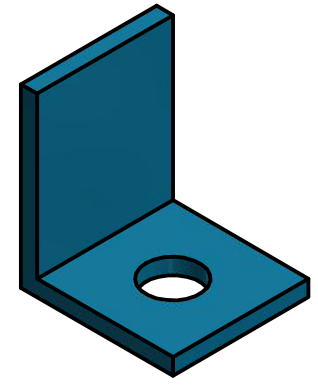
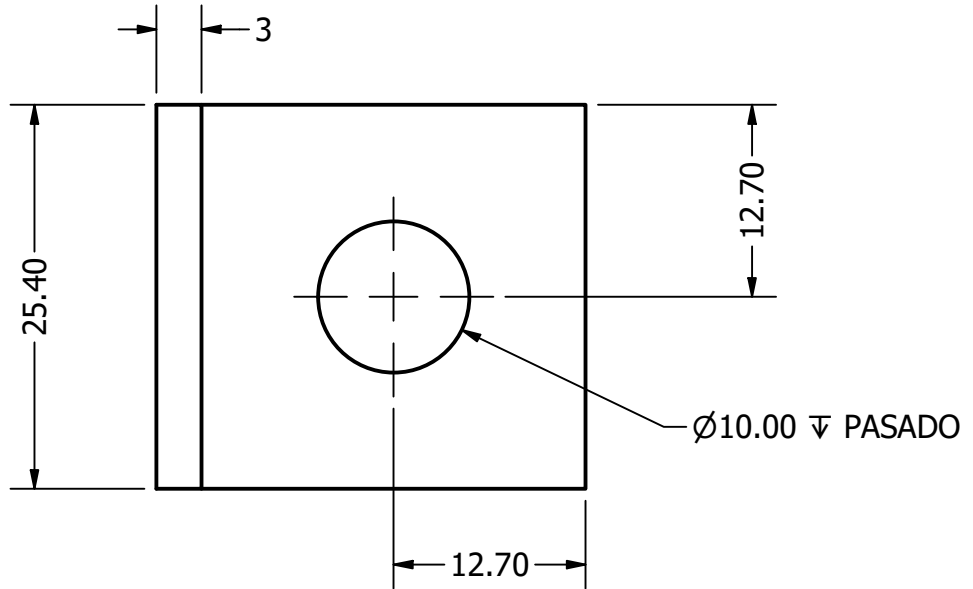
2X 1.00 X 45.0° bisel

TÍTULO: Disco compresor			
NÚMERO DE DIBUJO: MD01			
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: 2	
<b>A</b>	PÁGINA 7 DE 8		REV 0

2 1

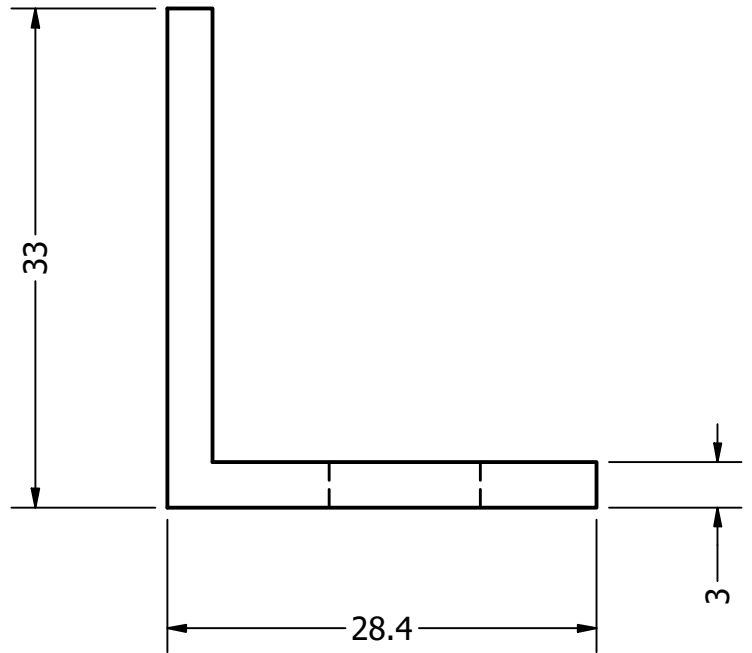
B

B



A

A



NOTA: MATAR FILOS VIVOS

TÍTULO: Sujetadores de molde		
NÚMERO DE DIBUJO: MD01		
FORMATO	ESCALA: 2:1	UNIDADES: 4
<b>A</b>	PÁGINA 8 DE 8	REV 0

2 1

A

## B. Protocolo de pruebas

## **UVG - Trabajo de graduación**

Juan Diego Girón Cordón - 16138

Ricardo Javier Herrera Contreras - 16749

Erick Eduardo Lafuente Hillermann - 16161

Arturo José González Ruiz - 16896



### **Protocolo de pruebas**

# **“Diseño y manufactura de un prototipo de una compactadora de plástico para el Centro Educativo Técnico Chixot”**

Octubre 27, 2021

## **Alcance**

El siguiente documento describe el procedimiento a seguir para fabricar dos ecoladrillos simultáneamente en la máquina compactadora. En este se describen los pasos cronológicos a seguir, el equipo necesario y las medidas de seguridad para operar la máquina adecuadamente y evitar cualquier riesgo.

Las pruebas se enfocaron en medir la temperatura y el tiempo adecuado para lograr un producto funcional por medio de la compactación del plástico reciclado, el cual debe ser firme y rígido al momento de su extracción.

## **Objetivos**

1. Determinar si la temperatura de operación propuesta (180 °C) es adecuada para la obtención de un ecoladrillo utilizando una cámara termográfica.
2. Determinar si la capacidad del gato hidráulico (2 toneladas) es suficiente para obtener un ecoladrillo.
3. Determinar el tiempo necesario desde el ingreso del plástico al molde hasta que se realiza la última compresión para obtener dos ecoladrillos.
4. Determinar el tiempo necesario desde que se realiza la última compresión hasta que la lectura de temperatura sea de 50 °C.

## **Materiales y equipo**

- Llaves de tuercas (Allen ¼" e inglesa de ¼")
- Plástico PET reciclado (retazos)
- Cronómetro
- Cinta métrica
- Balanza electrónica
- Lentes de seguridad
- Guantes de seguridad resistentes al calor
- Botas de punta de acero
- Bata para taller
- Kit de primeros auxilios
- Extintor

## **Medidas de seguridad**

Las pruebas se llevaron a cabo dentro de un garaje grande y despejado con conexión a un tomacorrientes de 120V por medio de una extensión. Todos los integrantes del grupo deben de utilizar guantes y lentes de protección para evitar quemaduras provocadas por el calor producido por la resistencia y que los pedazos de plástico tengan contacto con los ojos. A excepción de Ricardo Herrera, quien es el encargado de supervisar la operación y se debe asegurar de que se cumplan con las medidas de seguridad adecuadas. Además, mientras la

máquina se encuentre operando, se debe mantener la puerta cerrada para evitar cualquier contacto accidental con los moldes y las resistencias.

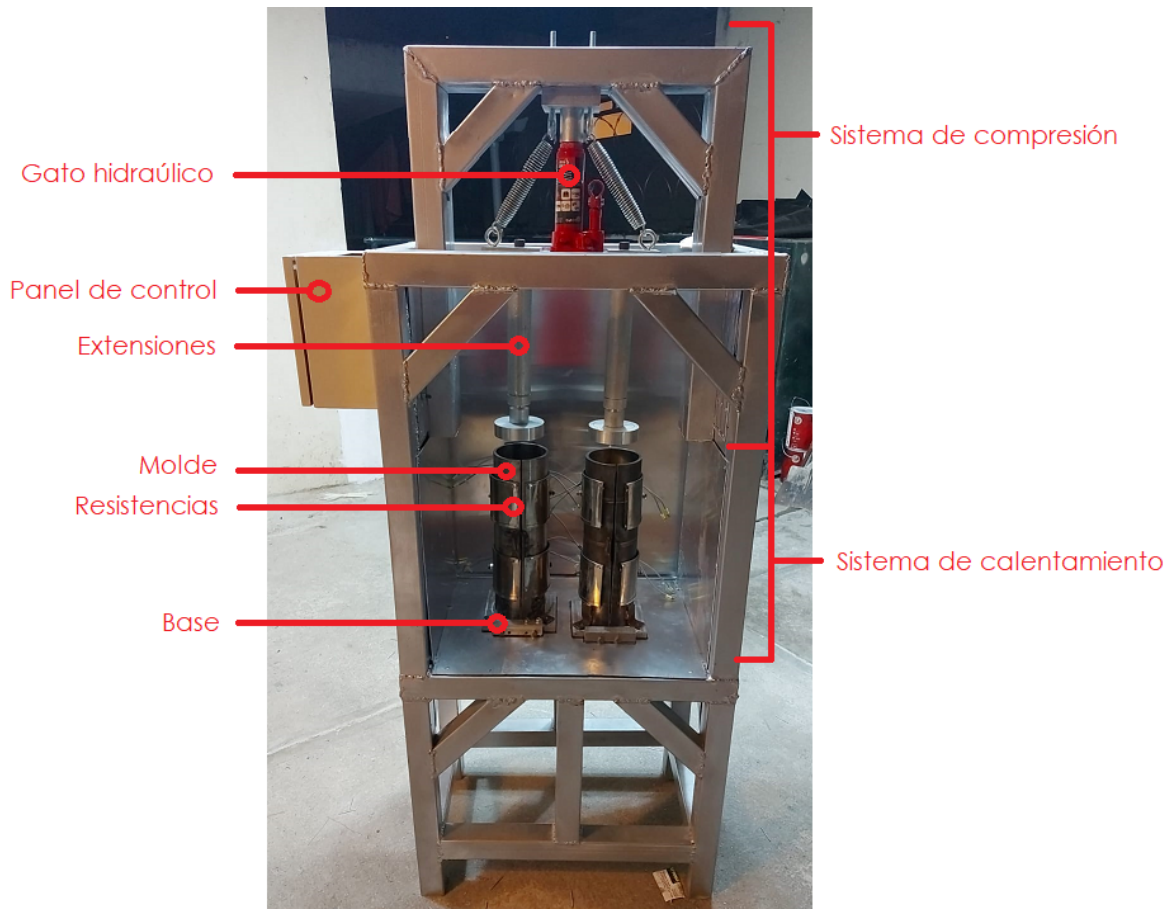
- **Teléfonos de emergencia:**
  - Bomberos municipales: 123
  - Alerta médica: 1711
  - Juan Diego Girón: 3011-2202 (Mónica Cordón)
  - Eduardo Lafuente: 5493-8563 (Erick Lafuente)
  - Ricardo Herrera: 3115-4732 (Ricardo Herrera)
  - Arturo González: 4219-8059 (Sergio González)

### **Consideraciones**

En cada prueba se debe insertar residuos de plástico PET en el molde. A partir de la segunda prueba se debe extraer la totalidad del plástico comprimido de la prueba anterior y limpiar el molde. Todo esto con el fin de evitar que las pruebas sean afectadas por restos plásticos ya deformados.

Además, se debe dejar enfriar el molde a una temperatura de 50 °C, capaz de resistir el calor con guantes de seguridad, y con el gato hidráulico ejerciendo presión para mantener cerrado el molde. De esta manera, se evitará una posible deformación en el plástico durante el curado.

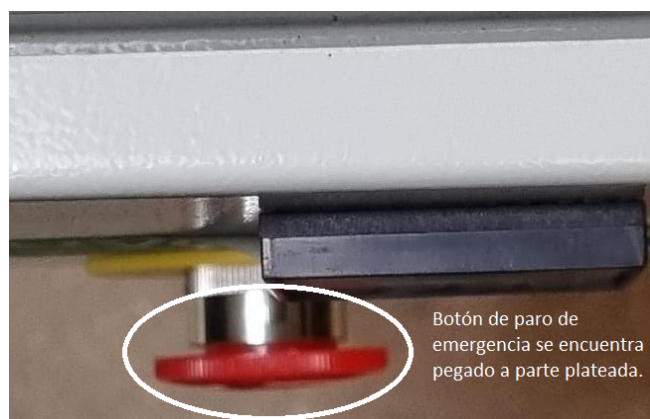
## Esquemmatización de la máquina



**Figura 1. Esquema de la máquina**

## Procedimiento de preparación y configuración

1. Asegurarse que todos cuentan con el equipo de protección y vestimenta adecuada.
2. Verificar que se cuenta con los materiales y equipo necesario para llevar a cabo las pruebas.
3. Verificar que el paro de emergencia esté presionado, como se muestra en la **Figura 2**.



**Figura 2. Paro de emergencia activado**

4. Verificar que el botón de encendido se encuentre apagado, con el símbolo "O" presionado. Este se muestra en la **Figura 3**.



**Figura 3. Botón de encendido desactivado**

5. Ajustar el gato hidráulico a su posición inicial al igual que las extensiones del sistema de compresión. En esta posición, la placa en donde se encuentra sostenido el gato hidráulico se encuentra alineada con el perfil superior de la estructura, como se muestra en la **Figura 4**.



**Figura 4. Posición inicial de sistema de compresión**

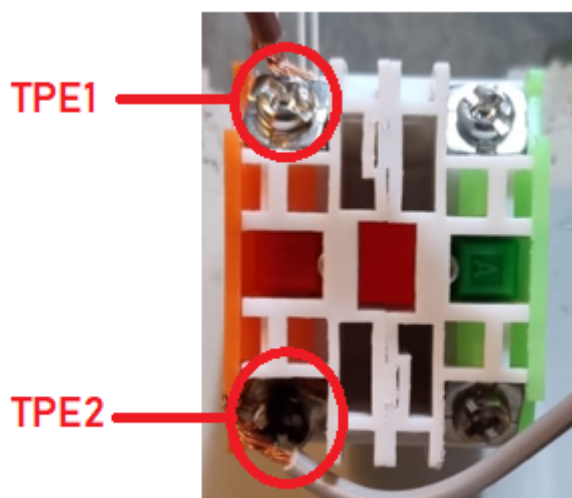
6. Verificar que la máquina esté conectada a la corriente con un voltaje de distribución de 120V.
7. Asegurar que las resistencias eléctricas estén fijadas a cada cavidad de los moldes, las cuales deben estar pegadas a la superficie. (Nota: no se deben apretar los tornillos completamente, solamente se debe buscar un contacto directo entre las superficies).

- Colocar un molde en cada base y asegurarlo con los tornillos, como se muestra en la **Figura 5**.



**Figura 5. Proceso de sujeción de cavidades por medio de tornillos**

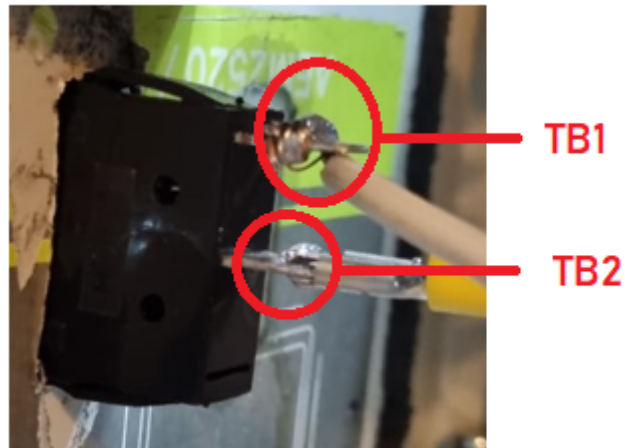
- Verificar que las conexiones del sistema eléctrico cumplan con la descripción que se muestra en las tablas 1, 2, 3, 4 y 5, siguiendo el etiquetado de los cables. Las figuras 6, 7, 8 y 9 muestran las terminales del paro de emergencia, botón de encendido, controlador de temperatura y relé de estado sólido de acuerdo al código de las etiquetas mostrado en las tablas.



**Figura 6. Terminales paro de emergencia**

**Tabla 1. Etiquetas que indican conexiones para paro de emergencia**

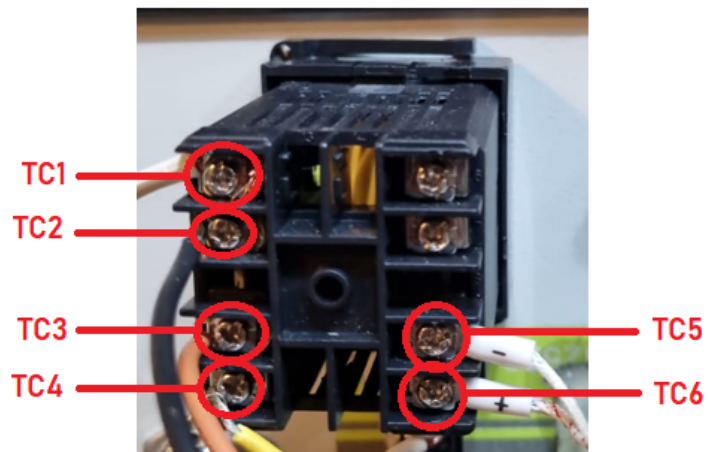
Paro de emergencia	
De	Hasta
TPE1	TB2
TPE2	P



**Figura 7. Terminales botón de encendido**

**Tabla 8. Etiquetas que indican conexiones para botón de encendido**

Botón de encendido	
De	Hasta
TB1	TC1
TB2	TPE1



**Figura 8. Terminales controlador de temperatura**

**Tabla 3. Etiquetas que indican conexiones para controlador de temperatura**

Controlador de temperatura	
De	Hasta
TC1	TB1
TC2	N
TC3	TR4
TC4	TR3
TC5	TT1
TC6	TT2



**Figura 9. Terminales relé de estado sólido**

**Tabla 4. Etiquetas que indican conexiones para relé de estado sólido**

Relé de estado sólido	
De	Hasta
TR1	P
TR2	TRP1
TR3	TC4
TR4	TC3

**Tabla 5. Etiquetas que indican conexiones para resistencias térmicas**

Resistencias térmicas		
De	Por	Hasta
TRP1	PP1	PR1
PP2	Conexión directa	PR2
PP3	Conexión directa	PR3
PP4	Conexión directa	PR4
PP5	Conexión directa	PR5
PP6	Conexión directa	PR6
PP7	Conexión directa	PR7
PP8	Conexión directa	PR8
N	NP1	NR1
NP2	Conexión directa	NR2
NP3	Conexión directa	NR3
NP4	Conexión directa	NR4
NP5	Conexión directa	NR5
NP6	Conexión directa	NR6
NP7	Conexión directa	NR7
NP8	Conexión directa	NR8

10. Liberar el paro de emergencia girando el botón en sentido horario. En la **Figura 10** se muestra el modo desactivado del paro de emergencia.

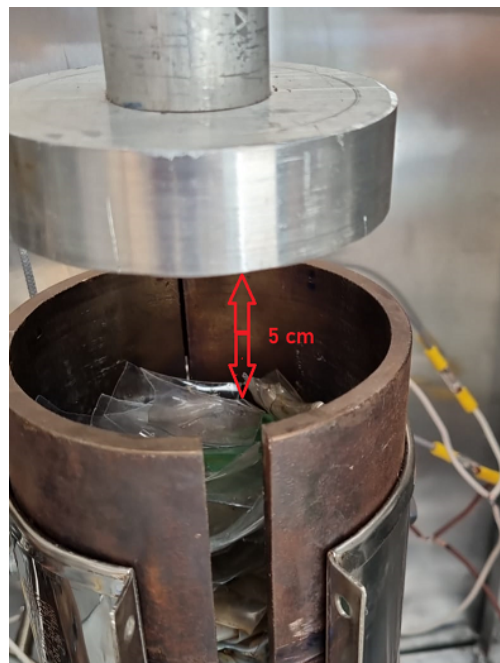


**Figura 10. Paro de emergencia desactivado**

11. Encender el sistema eléctrico con el botón de encendido con el símbolo "I" presionado.
12. Ajustar la temperatura límite (set point) en el panel de control entre 50°C y 80°C.
13. Realizar el procedimiento de pre-compresión de plástico que se describe a continuación.

#### **Procedimiento de pre-compresión de plástico**

1. Pesar el recipiente en el cual se tiene el plástico que ingresará al molde y anotar la medición.
2. Introducir los residuos de plástico dentro del molde, hasta alcanzar una altura de 5 cm por debajo de la superficie superior del molde.



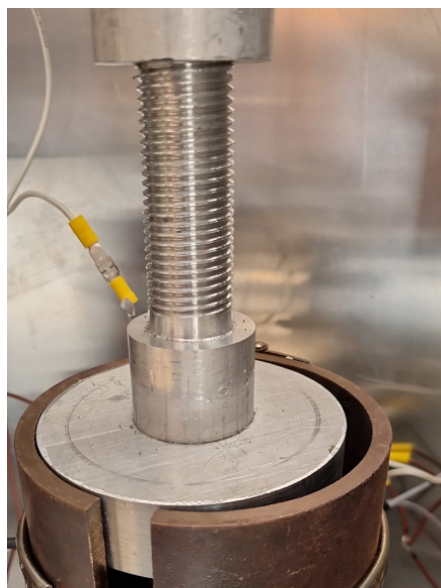
**Figura 11. Nivel de llenado de molde con retazos de plástico**

3. Girar en sentido horario las extensiones para alargar la estructura del sistema de compresión hasta que ya no puedan seguirse extendiendo.
4. Realizar una precompresión, accionando la palanca del gato hidráulico, hasta alcanzar el límite del mismo.
5. Retraer el gato hidráulico liberando la presión girando en sentido contrario a las agujas del reloj la válvula de alivio que se muestra en la **Figura 12**.



**Figura 12. Válvula de alivio de gato hidráulico**

6. Girar en sentido antihorario las extensiones para contraer la estructura del sistema de compresión hasta que tope.
7. Repetir pasos 1 a 6 hasta que el disco compactador esté a la misma altura de la superficie del molde, como se muestra en la **Figura 13**.



**Figura 13. Disco compactador alineado con superficie superior del molde**

### **Procedimiento de compactación**

1. Aumentar la temperatura límite (set point) en el panel de control hasta 160 °C.
2. Compactar el plástico hasta que el gato hidráulico ya no se extienda más.
3. Apagar el sistema eléctrico con el botón de encendido, con el símbolo "O" presionado.
4. Presionar el paro de emergencia.
5. Cronometrar el tiempo de enfriamiento hasta que el molde alcance una temperatura de 50°C.
6. Liberar la presión del gato hidráulico girando la válvula de alivio, regresando todo el sistema de compresión a su posición inicial de seteo.
7. Separar las cavidades del molde, retirando los tornillos en las pestañas, para extraer la pieza compactada (un molde a la vez). La **Figura 14** muestra esta separación.



**Figura 14. Separación de molde para retiro de plástico**

8. Unir nuevamente las cavidades del molde después de extraer la pieza compactada apretando los tornillos en las pestañas.
9. Pesarse nuevamente el recipiente en donde se encuentra el plástico que ingresa al molde, para restarlo con el peso inicial de este y obtener la diferencia.

## Resultados

<b>Previo a la prueba (llenado completo)</b>			
<b>No. Prueba</b>	<b>No. Precompresión</b>	<b>Pre-calentamiento (°C)</b>	<b>Tiempo de pre-compresión (min)</b>
1	1	180	8
1	2	180	9
1	3	180	8
1	4	180	9
1	5	180	8
1	6	180	8
2	1	180	11
2	2	180	12
2	3	180	12
2	4	180	14
3	1	180	10
3	2	180	11
3	3	180	7
3	4	180	8
3	5	180	9
4	1	180	14
4	2	180	8
4	3	180	11
4	4	180	7
4	5	180	9



<b>Posterior a la prueba</b>					
<b>No. Prueba</b>	<b>Tiempo enfriamiento (min)</b>	<b>Temperatura extracción (°C)</b>	<b>Altura final (cm)</b>	<b>Tiempo de extracción (min)</b>	<b>Peso de ecoladrillo obtenido (g)</b>
1	88	44	15	6	575
2	96	45	12	4	480
3	82	50	12	5	472
4	93	49	15	6	615



**Figura 15. Ecoladrillos obtenidos**

