

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño y fabricación del sistema de compresión de un
prototipo de una compactadora de plástico para el Centro
Educativo Técnico Chixot**

Trabajo de graduación presentado por Erick Eduardo Lafuente
Hillermann para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería
Mecánica Industrial

Guatemala
2022

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería

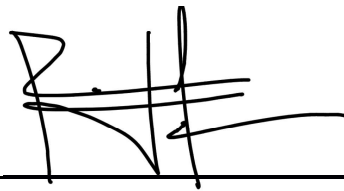


**Diseño y fabricación del sistema de compresión de un
prototipo de una compactadora de plástico para el Centro
Educativo Técnico Chixot**

Trabajo de graduación presentado por Erick Eduardo Lafuente
Hillermann para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería
Mecánica Industrial

Guatemala
2022

Vo.Bo.:


(f) 

Ing. Rony Herrarte

Tribunal Examinador:

(f) 

Ing. Rony Herrarte

(f) 

Ing. José Bagur

(f) 

Ing. Laura Roldán

Fecha de aprobación: Guatemala, 4 de enero de 2022.

Lista de figuras	VIII
Lista de cuadros	IX
Resumen	XI
Abstract	XIII
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
3. Justificación	5
4. Objetivos	7
4.1. Objetivo general	7
4.2. Objetivos específicos	7
5. Marco teórico	9
5.1. Sistemas de compresión	9
5.2. Factores por considerar para la selección de una prensa	9
5.3. Clasificación de las prensas	10
5.3.1. Clasificación de las prensas según su accionamiento	10
5.4. Dimensionamiento de una prensa hidráulica	13
5.4.1. Factores por considerar para la selección de una prensa hidráulica	13
5.4.2. Clasificación de las prensas hidráulicas	14
6. Metodología	17
6.1. Descripción de la metodología	17
6.2. Identificación de necesidades	18
6.3. Definición de requerimientos	19
6.4. Selección del tipo de sistema de compresión	20
6.5. Diseño	22
6.5.1. Factor de seguridad de diseño	22

6.5.2. Diseño preliminar	23
6.5.3. Diseño final	26
6.5.4. Simulación	32
6.6. Proceso de manufactura	37
6.6.1. Barra horizontal	38
6.6.2. Columnas compresoras	39
6.6.3. Ensamble con los demás módulos de la máquina	41
6.7. Pruebas	41
7. Resultados	43
7.1. Resultados del diseño	43
7.2. Resultados de la simulación	44
7.2.1. Escenario 1	44
7.2.2. Escenario 2	45
7.3. Resultados de la manufactura	47
7.4. Resultados de las pruebas	49
8. Conclusiones	51
9. Recomendaciones	53
10. Bibliografía	55
11. Anexos	57

Lista de figuras

1. Prensa hidráulica en C	14
2. Prensa hidráulica de doble montante	15
3. Prensa hidráulica de cuatro columnas	16
4. Gato hidráulico tipo <i>bottle jack</i>	21
5. Columnas compresoras - Diseño preliminar	24
6. Diseño preliminar del sistema de compresión	25
7. Contacto con la estructura de la máquina	26
8. Elemento guía para el vástago del gato hidráulico	27
9. Conjunto que alinea el gato hidráulico verticalmente	27
10. Barra horizontal de la estructura	29
11. Distribución vertical del espacio dentro de la cámara de compresión - Columnas compresoras retraídas	30
12. Distribución vertical del espacio dentro de la cámara de compresión - Columnas compresoras extendidas	30
13. Bushing	31
14. Ensamble de las columnas compresoras y sus extensiones	31
15. Diagrama de cuerpo libre de la estructura	32
16. Configuración de los soportes fijos	34
17. Fuerza generada por el gato hidráulico	35
18. Configuración de fuerzas en las armellas	35
19. Escenario 1 simulado	36
20. Escenario 2 simulado	36
21. Material disponible en la Universidad del Valle de Guatemala	37
22. Material cortado previo a maquinarse	37
23. Fresado del tramo de barra rectangular de 1" x 4"	38
24. Barra horizontal manufacturada	38
25. Maquinado en torno convencional de los tramos de barra redonda de 1-3/4"	39
26. Tramo exterior	40
27. Bushings manufacturados	40
28. Extensiones de las columnas compresoras	41
29. Diseño final del sistema de compresión	43

30. Resultados de deformación total en la simulación - Escenario 1	44
31. Resultados de esfuerzos de von Mises en la simulación - Escenario 1	45
32. Resultados de factor de seguridad en la simulación - Escenario 1	45
33. Resultados de deformación total en la simulación - Escenario 2	46
34. Resultados de esfuerzos de von Mises en la simulación - Escenario 2	46
35. Resultados de factor de seguridad en la simulación - Escenario 2	46
36. Ensamble de la estructura que distribuye los esfuerzos a los moldes	47
37. Sistema de compresión instalado en la máquina (a)	48
38. Sistema de compresión instalado en la máquina (b)	48
39. Pruebas - Medios ladrillos	49
40. Pruebas - Ladrillos completos	49

Lista de cuadros

1. Clasificación de prensas	10
2. Requerimientos funcionales del sistema de compresión	19
3. Requerimientos operacionales del sistema de compresión	19
4. Limitantes del sistema de compresión	19
5. Matriz de decisión de sistemas de compresión	20
6. Matriz de decisión de sistemas hidráulicos	20
7. Matriz de decisión de tipos de prensas hidráulicas	21

Se identificó la necesidad de encontrar un uso para los residuos de las botellas de polietilentereftalato (PET) que el Centro Educativo Técnico Chixot produce durante la fabricación de techos con botellas PET. El Centro educativo utiliza la parte central de las botellas para la construcción de techos, dejando como remanente las partes superior e inferior de las botellas. Existe un potencial para dar un valor agregado a estos desechos a través de su compactación obteniendo un bloque para construcción. Para esto, se diseñó y fabricó un prototipo de una compactadora de plástico, la cual está conformada por cuatro módulos: carcasa y estructura, sistema de calentamiento y molde, sistema de compresión, y sistema eléctrico e ingeniería de sistemas.

Se determinó el sistema de compresión indicado para la compactadora y se diseñó en Autodesk Inventor 2019. Se realizó un análisis de esfuerzos internos en ANSYS Workbench 2021 R1 para garantizar la integridad del sistema y de los demás módulos. También, se construyó una estructura que permite distribuir el esfuerzo generado por el sistema de compresión hacia dos moldes. El sistema está constituido, en su mayoría, por componentes y materiales disponibles en el mercado guatemalteco. Durante las pruebas se pudo identificar que el sistema logra cumplir su función. Este provee la presión necesaria para compactar el plástico reciclado dentro de los moldes y cumple con todos los requerimientos planteados para el proyecto. Además, considerando los peores escenarios, se cumplió con el factor de seguridad mínimo para el diseño, obteniendo un factor de 3.85 para el peor de los casos durante la operación. El sistema de compresión funcionó y se acopló correctamente con los demás módulos.

It was identified the necessity of finding an application for the plastic waste that results from the school *Centro Educativo Técnico Chixot* after using bottles made out of polyethylene terephthalate (PET) for the construction of ceilings, which utilize only the middle part of the bottles. The process leaves residuary plastic, which are the top and bottom parts of the bottle, that can potentially be given an added value through its compaction to form a building block. Therefore, the prototype for a plastic compactor was designed, fabricated, and conformed by four modules: casing and structure, heating system and mold, compression system, and electric system and systems engineering.

A suitable type of compression system for the compactor was determined and designed in Autodesk Inventor. An internal stress analysis was done to guarantee the integrity of the system and every other module. Additionally, a structure capable of distributing the stress generated by the compression system into two molds was manufactured. The compression system is composed, mainly, of components and materials which are available in the Guatemalan market. The compression system focuses on providing the necessary pressure for the plastic to be compressed and the mechanical properties needed by the building block to fulfill its function, this was confirmed during the tests. The compression system meets the project's requirements. Also, when taking into account the worst possible scenarios, the minimum safety factor is 3.85 during the machine's operation. The module worked correctly and in tune with the other modules.

Este documento presenta el proceso de diseño, análisis y manufactura de un sistema de compresión para un prototipo de una compactadora de polietilentereftalato (PET) para el Centro Educativo Técnico Chixot. Este centro educativo realiza proyectos que fomentan el reciclaje y el cuidado del medio ambiente, por medio de la participación del personal y los estudiantes. La mayoría de los proyectos van enfocados hacia el uso de desechos para la construcción de estructuras. Actualmente, la mayoría del procesamiento de desechos se realiza manualmente, entre estas actividades se encuentra la producción de ecoladrillos. Las personas del centro educativo compactan todo tipo de desechos dentro de botellas de plástico de dos litros, creando ecoladrillos. Entre los proyectos más importantes está la fabricación de tejas utilizando la parte central de las botellas de PET, dejando como remanente los extremos de las botellas. La compactadora de plástico busca aprovechar estos residuos para facilitar y agilizar la producción de ecoladrillos, por medio de presión y calor.

El proyecto comenzó con una investigación detallada de los diferentes métodos de compresión, especialmente las máquinas utilizadas para la compactación de materiales en la industria. El enfoque principal de la investigación fueron las características de cada tipo de sistema de compresión. Conforme se descartaron opciones, se profundizó en más características de las alternativas restantes, como sus clasificaciones y criterios de dimensionamiento. Con esto se establecieron las líneas base para la selección de las características del sistema de compresión que se adecuaban a la aplicación que se le dará a la compactadora de plástico.

Para el diseño del sistema de compresión se definieron las características básicas que este debía tener, entre ellas, el tipo de sistema que se debía usar de acuerdo a su aplicación y el tonelaje necesario para el funcionamiento de la máquina; para lo que se utilizó un sistema hidráulico. La característica principal que el sistema de compresión debía tener era la capacidad de transmitir el esfuerzo del gato hidráulico hacia dos moldes. Se buscó que el sistema cumpliera con los requerimientos, tanto de este módulo, como de los demás, para asegurar la seguridad e integridad de los operadores y de la máquina, por ejemplo, el módulo de carcasa y estructura requería que la fuerza máxima ejercida por el sistema fuera de 2 toneladas. Se definió un factor de seguridad mínimo para el diseño de 1.9. La totalidad del

diseño se realizó en *Autodesk Inventor 2019*, en donde se modelaron las piezas y se definieron las dimensiones generales del sistema. Considerando las limitaciones del diseño preliminar del sistema, se rediseñó para obtener un módulo capaz de unirse a los demás módulos y cumplir con sus requerimientos. Tras la validación del diseño, se realizaron simulaciones en *ANSYS Workbench 2021 R1* para confirmar que los componentes del sistema soportan los esfuerzos generados durante la operación.

Al verificar que los diseños soportaban los esfuerzos generados durante la operación de la máquina, se pudo proceder con el proceso de manufactura. El sistema de compresión se manufacturó en su totalidad en las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala. Se aprovecharon los recursos disponibles en la Universidad, como perfiles de aluminio. Se utilizaron las máquinas herramienta disponibles en la Universidad, principalmente el torno, la fresadora, las máquinas CNC y el taladro. Tras la manufactura y ensamble del sistema de compresión, se acopló a los demás módulos para poder verificar su correcto funcionamiento.

En los últimos años se ha tenido un aumento drástico de proyectos que buscan aprovechar los residuos sólidos como materia prima, convirtiéndolos en algo que les pueda dar un segundo uso. Entre las varias aplicaciones propuestas, destacan aquellas que van dirigidas a la construcción de viviendas y otras estructuras. En Sudamérica se han desarrollado ladrillos llamados Brickarp, los cuales se forman al mezclar varios tipos de plástico triturado y cemento. La fabricación del ladrillo Brickarp se basa en un sistema de construcción alternativo, fundamentado en la utilización de plástico reciclado de difícil disposición final. Destaca en el sistema de construcción con este material su armado tipo Lego, lo que permite la confección de viviendas en pocos días; además, de no ser necesaria experiencia previa para su instalación. Resaltan además algunas cualidades del plástico como elemento a ser incluido para la construcción, tales como resistencia a la humedad, durable, inmune a insectos, roedores y microorganismos, no requiere mantenimiento, de fácil instalación, no amerita mano de obra calificada y sobre todo competitiva económicamente. La función del plástico es aumentar la rigidez estructural del ladrillo, mientras se disminuye la cantidad de cemento necesario para fabricarlo. Además, estos ladrillos cuentan con la característica de que su geometría permite encajarlos por medio de una ranura, facilitando la construcción de paredes. (Castillo, 2018)

En cuanto a métodos de compresión de plástico, existe una variedad de procesos que, en su mayoría, se enfocan en reducir el espacio que estos residuos ocupan. De manera que se pueda manipular con mayor facilidad. Cuando se busca deformar el plástico para darle un nuevo uso se suele recurrir a metodologías que requieren calor y presión. Según Mohd (2016), el método más efectivo para procesar residuos plásticos y adecuarlos a una nueva forma, es el moldeo por compresión; un método similar, en concepto, a la pulvimetalurgia. Este consiste en precalentar el material a moldear y aplicar altas presiones para obligar a que este entre en contacto con las paredes del molde. Tras mantener altas temperaturas y presiones, el material se cura, dándole así una nueva forma adecuada al molde. Para realizar este método de compresión se suele utilizar una prensa de alto tonelaje, ya que, para una mayor presión es necesaria una menor temperatura. Aunque a temperaturas altas, los plásticos comienzan a fundirse, lo que genera problemas de contaminación adicionales.

También se han diseñado máquinas compactadoras que realizan su trabajo únicamente con presión. Uno de los ejemplos más claros de esto se presenta en el trabajo de Ortiz Beltrán (2014), en donde se diseña una máquina compactadora cuyo producto final son bloques nutricionales para ganado. En este caso, se introduce la materia comestible y por medio de presión se compacta dentro de un molde rectangular para formar los bloques de alimento.

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. En otro proyecto, utilizan la parte central de botellas de plástico PET para fabricar de techos para sus salones. Debido a que no se utilizan las botellas completas, este proceso produce desechos de las 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 puede brindar un segundo uso a los residuos de botellas PET que generen un valor para la construcción de infraestructura local.

La importancia del módulo de compresión radica en que el fin de la máquina no es fundir el plástico, sino llegar a un punto en el que el plástico se pueda moldear con facilidad, reduciendo la cantidad de energía necesaria para la compresión. Por esto es necesario que la compactadora cuente con un sistema de compresión. El objetivo de este módulo es proporcionar la presión necesaria para asegurar la compactación del plástico en conjunto con el módulo de calentamiento y molde. El análisis de esfuerzos del sistema de compresión proveerá información detallada de los esfuerzos que este generará sobre otros módulos para que sean tomados en cuenta en su análisis. Debe contar con la selección del método de compresión adecuado para la aplicación propuesta, y los acoples que permitan su ensamble con la estructura de forma no permanente. Se espera que el sistema logre ejercer la presión necesaria para reducir el volumen del plástico en el molde y obtener un sistema modular para facilitar su mantenimiento o reemplazo.

4.1. Objetivo general

Diseñar, analizar y manufacturar el sistema de compresión del plástico calentado de la compactadora de plástico PET.

4.2. Objetivos específicos

- Evaluar diferentes sistemas de compresión para la compactadora.
- Determinar el método más eficiente para distribuir el esfuerzo generado hacia dos moldes.
- Diseñar un sistema de compresión que cumpla los requisitos para el ensamble con los módulos de Sistema de Calentamiento, y Estructura y Carcasa.
- Verificar que los componentes del sistema soporten la presión necesaria para compactar el plástico.
- Manufacturar el sistema de compresión utilizando materiales disponibles localmente.

5.1. Sistemas de compresión

Existen diferentes métodos de compresión, para el fin de este trabajo se estudiará el método de compresión mediante prensa. Una prensa es una máquina que sirve para compactar o reducir el volumen de un determinado objeto a través de la aplicación de fuerza en una superficie sobre otra u otras superficies (Esteves, 2003). Se realizará una comparación entre los sistemas más utilizados, los cuales son el sistema mecánico, hidráulico y neumático. La compactación se realiza mediante una prensa diseñada específicamente para esta aplicación, ya que estas máquinas se pueden utilizar para operaciones de corte, punzonado, doblado, curvado o embutición.

5.2. Factores por considerar para la selección de una prensa

El primer paso para determinar el tipo de prensa a utilizarse es considerar si en realidad una prensa es la máquina adecuada para la aplicación que se planea desarrollar. Se deben tomar en cuenta los siguientes factores (Viking International Group, 2018).

- a. La operación por realizarse influye directamente en el tipo de prensa a utilizarse, por lo que se debe considerar la forma de su estructura principal y de su energía de accionamiento.
- b. El material u objeto que será prensado o compactado determina la fuerza, precisión y energía de accionamiento de la prensa. También se debe considerar el tamaño de esto, ya que determinará las dimensiones de la mesa, la luz y la carrera. Se recomienda utilizar una carrera lo más corta posible, para evitar el deterioro de las partes, pero con la suficiente longitud para la correcta manipulación del material.

- c. La producción en términos de tiempo determina la velocidad de trabajo del sistema, que se ve directamente relacionado a la potencia necesaria para la máquina. Además, el sistema de alimentación debe adaptarse para el material fluya.
- d. En cuanto al factor monetario, es importante considerar el precio del producto procesado por la prensa, el cual determina el límite de inversión y permite conocer las características del tipo de prensa adecuada para la aplicación.

5.3. Clasificación de las prensas

Cuadro 1: Clasificación de prensas

Clasificación	Según sus elementos activos	Según la posición en el espacio de las guías	Según la velocidad	Según su accionamiento	Según su estructura	Según su agente motor
A.	De simple efecto	Verticales	Convencionales (de 12 a 200 ciclos por minuto)	Mecánicas	Cuello de cisne	Manuales
B.	De doble efecto	Horizontales	Rápidas (de 300 a 700 ciclos por minuto)	Hidráulicas	De doble montante	De gravedad
C.	De triple efecto	Inclinadas	De alta velocidad (de 800 hasta 1600 ciclos por minuto)	Neumáticas	De cuatro columnas	De motor

Fuente: (Esteves, 2003)

Considerando la aplicación para la cual se desea utilizar una prensa, la clasificación que se adecúa es la clasificación según su accionamiento. Posteriormente se indagará en las definiciones y características principales de estas prensas, al igual que sus ventajas y desventajas. De igual manera, es necesario determinar el tipo de la prensa en cuanto a las demás clasificaciones por lo cual se consideró, para facilitar el diseño de la compactadora de plástico, que se debe definir como una prensa manual de posición vertical y de simple efecto. Las características por definir serán la estructura y el accionamiento.

5.3.1. Clasificación de las prensas según su accionamiento

Prensas mecánicas

Las prensas mecánicas fueron las primeras en inventarse, y fueron las más utilizadas durante muchas décadas. Una prensa mecánica funciona con un motor que se encuentra co-

nectado mediante un embrague de fricción a un volante, que a su vez está unido a un cigüeñal que lo hace girar directamente o por medio de engranajes o bandas. El funcionamiento de dicho motor es continuo, siendo el acople y desacople del embrague el que determina el funcionamiento de la prensa. El motor se opera desde un control manual, usualmente se utiliza un pedal. De esta manera, el cigüeñal transmite el movimiento a una biela, que a su vez transfiere su desplazamiento al cabezal que tiene un movimiento lineal deslizado en guías y realiza el trabajo. Además, la prensa posee un freno que detiene el cigüeñal cada vez que este se desconecta del embrague. (Esteves, 2003)

Las prensas mecánicas se pueden clasificar según el método de aplicación de potencia al ariete. Entre las clasificaciones principales de este rubro se encuentran las siguientes. Las prensas de pedal, utilizadas para trabajos livianos y poco complejos. Las prensas de manivela, utilizadas en operaciones de recorte, perforado y estirado. Las prensas de conducción excéntrica, utilizadas únicamente cuando se necesita un solo martinete de golpe corto. Las prensas de acción de leva, las cuales cuentan con un reposo en la parte inferior del golpe, por lo que se utilizan para accionar los anillos de sostén del disco en prensas de estampado. Las prensas de conducción por charnela, utilizadas cuando se requiere un gran adelanto mecánico y una acción rápida. Por último, se encuentran las prensas de palanca acodillada, utilizadas en las prensas de estirado para accionar el soporte de discos. (Esteves, 2003)

Prensas neumáticas

Las prensas neumáticas operan por medio de la transmisión de energía de aire comprimido hacia un cilindro neumático, con lo que se produce un movimiento lineal con una fuerza y velocidad determinadas. El principio de funcionamiento de este tipo de mecanismos se basa en la ley de los gases ideales, en la cual se utiliza energía para comprimir un gas, y este devuelve la misma energía cuando se descomprime. (Sonera y col., 2017)

Ventajas de la prensa neumática

- a. Las prensas neumáticas pueden moverse a velocidades altas y con una fácil regulación.
- b. Al utilizar aire los componentes de un circuito no se dañan por efecto de golpes de ariete.
- c. Dado que el aire es de fácil almacenamiento y se cuenta con un suministro prácticamente ilimitado, su sistema de funcionamiento es más económico.
- d. Las sobre cargas no presentan un riesgo o daño permanentes en los equipos.
- e. Las prensas neumáticas tienen un alto grado de versatilidad, se pueden colocar en cualquier posición y dado que trabajan con aire, se utilizan en aplicaciones donde la higiene es indispensable.
- f. Dado que estas prensas tienen menos piezas y sus sistemas de control son más sencillos, el mantenimiento es más económico.

(Sonera y col., 2017)

Desventajas de la prensa neumática

- a. Las prensas neumáticas se ven limitadas por la presión que puede alcanzar el aire comprimido, por lo que no son utilizadas en aplicaciones que requieran grandes fuerzas.
- b. Se producen pérdidas de carga considerables cuando los circuitos de control y distribución previos a la prensa son muy extensos.
- c. La descarga del aire hacia la atmósfera genera altos niveles de ruido.
(Sonera y col., 2017)

Prensas hidráulicas

Las prensas hidráulicas son mecanismos conformados por uno o varios pistones, los cuales mediante un líquido que circula a través de ellos realizan un movimiento lineal. El principio de funcionamiento de una prensa hidráulica es el de un vaso comunicante descrito por el principio de Pascal, el cual establece que cada terminación del vaso tiene un área diferente y al aplicar una fuerza sobre cualquiera de las dos áreas, se obtiene una fuerza proporcional en la otra área. La característica principal de este tipo de prensas es que utilizan un fluido incompresible y altas presiones, por lo cual se pueden diseñar para muchos rangos de fuerza, utilizando dimensiones grandes y uno o varios cilindros. (Maquituls, 2017)

Este tipo de prensas se utilizan principalmente en la aplicación de fuerzas de levantamiento de carga pesada o fuerzas de compresión. Dado que presentan un alto desempeño, larga duración y bajo costo, con respecto a la magnitud de fuerza que pueden alcanzar, estas han sido utilizadas en otras aplicaciones. Por ejemplo: troqueles, moldeadoras de plástico, prensas de corte o plegadoras. (Maquituls, 2017)

Ventajas de la prensa hidráulica

- a. Las prensas hidráulicas mantienen una fuerza constante a lo largo de toda la carrera del actuador, por lo que no es necesario calcular variaciones.
- b. Este tipo de prensas tiene un menor costo de adquisición, respecto a la relación de precio por fuerza.
- c. El costo de mantenimiento es bajo, ya que tienen un diseño sencillo que presenta pocas partes en movimiento y se encuentran prácticamente permanentemente lubricadas, porque funcionan usualmente, con aceite. Por esto, no ocurren averías constantemente, y cuando ocurren son defectos menores y de fácil corrección. De igual manera, el diseño sencillo estas máquinas permite reparar o sustituir cualquier pieza sin la necesidad de hacer desmontajes de piezas de mayor tamaño.
- d. La prensa cuenta con una válvula de seguridad que evita sobrecargas, por lo que no corre riesgo de romper piezas o dañar la misma máquina por excedentes de fuerza.
- e. Las prensas hidráulicas permiten una variedad de controles, por ejemplo: fuerza, carrera, tiempo de ciclo, contadores, etc.

- f. La magnitud de la fuerza que puede ejercer la máquina no es proporcional al tamaño, por lo que se pueden diseñar prensas hidráulicas de pequeñas dimensiones y grandes fuerzas.
- g. Al tener menos partes en movimiento, el nivel de ruido que genera la máquina es bastante bajo, donde la bomba es lo más ruidoso.

(Maquituls, 2017)

Desventajas de la prensa hidráulica

- a. Las prensas hidráulicas tienen una velocidad de trabajo bastante reducida en comparación a otros tipos de prensa.
- b. El control de la longitud de carrera requiere de métodos complejos que pueden ser invasivos al sistema principal de cilindros. Se pueden utilizar controles electromecánicos o electrónicos, donde el electromecánico es ligeramente más preciso. Además, se pueden usar controles de presión, de manera que al alcanzar una presión determinada el pistón retroceda.

(Maquituls, 2017)

5.4. Dimensionamiento de una prensa hidráulica

La prensa hidráulica es el tipo de prensa que se adecúa de mejor manera a la aplicación de compactación de plástico, debido a su alta magnitud de fuerza constante, reducido espacio ocupado y fácil acceso para su mantenimiento. Por lo que se indagará en sus características principales para determinar qué tipo de prensa hidráulica se seleccionará.

5.4.1. Factores por considerar para la selección de una prensa hidráulica

- a. El tonelaje: se debe determinar la fuerza requerida para llevar a cabo la aplicación para la cual se seleccionó la prensa.
- b. La acción: es necesario definir el trabajo para el cual se utilizará la prensa.
- c. La estructura: es un factor que depende directamente de la acción a realizar. Se debe considerar la fuerza que la estructura tiene que soportar y la presión de la misma. Además, este factor determina la cantidad de accesos disponibles para llegar al material que se comprime.
- d. Los accesorios: este factor depende del nivel de automatización y control que se le quiera dar a la máquina. Ya que se pueden colocar sensores de presión, controles de tiempo de prensado, una amortiguación hidráulica, entre otros.

(Ortiz Beltrán, 2014)

5.4.2. Clasificación de las prensas hidráulicas

Según los parámetros previamente definidos, la estructura es el factor más importante a considerar para la aplicación que se desea dar a la prensa. Por esto, se seleccionará una prensa hidráulica clasificándolas por su estructura. Entre las estructuras más comúnmente comercializadas se encuentran las siguientes.

Prensas en C o cuello de cisne

Esta prensa debe su nombre a la forma de su estructura, compuesta por un marco rígido y una torsión equilibrada, permitiéndole tener alta rigidez y precisión. En la parte superior se coloca un cilindro hidráulico que suministra la fuerza hacia el cabezal que aplica la presión sobre el molde u objeto a ser comprimido. La mayoría de las prensas en C cuentan con una fuerza máxima de 200 toneladas y acceso en tres de los cuatro lados del material. Este tipo de prensa hidráulica se utiliza principalmente para tensar metal y moldearlo, en el procesamiento de materiales no metálicos y en la metalurgia de polvos. (Ortiz Beltrán, 2014)

Figura 1: Prensa hidráulica en C



Fuente: (RAM, 2017a)

Prensas de doble montante

Las prensas de doble montante se caracterizan por su estructura que consta de columnas que son unidas en tres puntos a lo largo de su altura: el soporte del cilindro hidráulico en la parte superior, la mesa de trabajo, y una viga horizontal adicional que une las columnas y se encuentra en contacto con el suelo. Este tipo de prensas tiene una gran variedad de formas, pero las más utilizadas son dos, el tipo monobloc y el tipo H. La diferencia principal entre estos dos tipos son que el tipo monobloc se encuentra totalmente soldada, por lo que se toma como una sola pieza rígida, mientras que la tipo H posee una mesa de trabajo con

altura ajustable. Además, el tipo monobloc es de mayor tamaño y alcanza tonelajes más altos.

Una de las ventajas que tiene este tipo de prensas es que se le puede colocar una gran variedad de controles eléctricos, hidráulicos y electrónicos. Esta característica les da una versatilidad superior a los demás tipos de prensas hidráulicas. Se suelen utilizar en aplicaciones de corte y conformados pesados, y se diseña principalmente para trabajos que requieren el proceso de prensado. (Ortiz Beltrán, 2014)

Figura 2: Prensa hidráulica de doble montante



Fuente: (Tipos, 2014)

Prensas de cuatro columnas

La estructura de este tipo de prensas se compone de cuatro columnas, como lo expone su nombre, las cuales funcionan como guías para el movimiento lineal del cabezal del cilindro hidráulico. Al igual que los otros tipos de prensas hidráulicas definidos anteriormente, el cilindro hidráulico se encuentra en la parte superior de la prensa. Las prensas de cuatro columnas presentan un gran espacio de trabajo vertical y cuatro puntos de acceso al material, por lo que la seguridad es un factor muy importante. La mesa de trabajo se encuentra comúnmente al nivel del panel de control, por lo que no tiene una altura modificable. De la misma manera que la prensa de doble montante, se le pueden implementar varios controles y ajustes, que permiten que sea muy versátil. Se utilizan en aplicaciones de trabajo con forjado, perforado, encorvado, aplanado y ensambles multi-prensas para líneas de producción automáticas. (Ortiz Beltrán, 2014)

Figura 3: Prensa hidráulica de cuatro columnas



Fuente: (RAM, [2017b](#))

6.1. Descripción de la metodología

Se realizó una investigación para determinar las especificaciones de los diferentes tipos de sistemas de compresión y seleccionar el que mejor se adecua al proyecto. Entre los temas investigados están las características, componentes, ventajas, desventajas, aplicaciones comunes y clasificaciones. Se procedió a definir los principales factores que influyen en la selección del tipo de sistema de compresión, considerando los objetivos del módulo. Se seleccionó un sistema de compresión hidráulico debido a que su tamaño es menor respecto a los demás sistemas y que provee presiones altas y constantes con un mínimo esfuerzo.

Tras seleccionar el tipo de sistema de compresión a utilizar, se definieron los requisitos del módulo, acoplándose a los requisitos generales del proyecto. Con esto se pudo proceder con el proceso de selección de componentes y materiales necesarios para construir un sistema de compresión que cumpla con la finalidad del proyecto. Se buscó cumplir con que la mayoría de los componentes y materiales se encontraran disponibles en el mercado guatemalteco. El objetivo de esto fue asegurar que la máquina podría recibir mantenimiento o ser sus componentes reemplazados en caso de daños o roturas. Una vez definidos los componentes y materiales a utilizar, se realizó el diseño preliminar del sistema de compresión en Autodesk Inventor para visualizar el modelo y comprobar que se acoplaba correctamente con los demás módulos. Al tener la información conjunta de los demás módulos se realizaron iteraciones al diseño para asegurar que cumplía con las especificaciones deseadas.

Para finalizar la fase de diseño del sistema de compresión, se diseñó el acople para los moldes. El fin de este fue permitir que los esfuerzos generados por el sistema hidráulico fueran distribuidos a ambos moldes.

Después de completar el diseño, se procedió a realizar los análisis y simulaciones corres-

pondientes para calcular los esfuerzos que el sistema de compresión ejerce sobre los demás módulos y los esfuerzos internos generados por la presión. Las simulaciones se realizaron en el software de análisis de elementos finitos ANSYS Workbench 2021 R1. Se tomaron en cuenta las sujeciones del sistema, los contactos con los demás módulos y la capacidad del sistema de compresión. El análisis se realizó con el fin de determinar la resistencia estructural del sistema y asegurar su integridad y la de los demás módulos. Con base en los resultados del análisis se realizaron modificaciones finales al diseño preliminar del sistema, asegurando que al construirlo cumpliría con sus objetivos y requerimientos.

Al tener validado el diseño del sistema de compresión se inició con la manufactura del módulo, principalmente en el taller de metalmecánica de la Universidad Del Valle de Guatemala. Los materiales utilizados se cortaron con una cortadora plasma y con herramientas cortantes, según la complejidad del corte. Este módulo se manufacturó en conjunto con los demás módulos para poder realizar el ensamble y completar la máquina compactadora.

Por último, se realizaron pruebas de cada módulo para comprobar su funcionamiento individual. Tras verificar esto, se procedió con pruebas de la máquina como un sistema conjunto. Se comprobó que el producto final se entregara con una calidad aceptable y que los esfuerzos ocasionados no afectarían la integridad de los módulos de carcasa y estructura, y de calentamiento y molde.

6.2. 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 dio a entender 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 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 una de las entrevistas realizadas con el contacto del Centro Educativo Técnico Chixot, 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 necesarios, concretamente hablando de tamaño y peso. Por lo tanto, se decidió comenzar el proceso de diseño y manufactura de una compactadora de plástico que cumpla con los propósitos discutidos.

En cuanto a las necesidades intermodulares del proyecto, se identificaron los siguientes requerimientos a cumplir. En conjunto con el módulo de carcasa y estructura, el tonelaje máximo que puede tener el sistema de compresión es de 2 toneladas, de acuerdo al análisis estructural realizado por este módulo. Mientras que para el módulo del sistema de calentamiento y molde, la carrera del sistema de compresión debe abarcar el espacio libre de 4" que se encuentra sobre los moldes para el ingreso de plástico no procesado y alcanzar al menos la mitad de la profundidad de los moldes, resultando en una carrera total de entre 226 mm y 252 mm.

6.3. Definición de requerimientos

En el Cuadro 2 se observan los requerimientos definidos por otros módulos de la compactadora. El FSC-001 proviene del módulo de carcasa y estructura, mientras que el FSC-002 proviene del módulo del sistema de calentamiento y molde.

Cuadro 2: Requerimientos funcionales del sistema de compresión

Código	Requerimiento
FSC-001	El sistema de compresión debe tener una fuerza de compresión máxima de 2 toneladas.
FSC-002	El sistema de compresión debe tener una carrera total mínima de 226 mm.
FSC-003	El sistema de compresión debe permitir la transmisión de esfuerzos hacia dos moldes.

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3: Requerimientos operacionales del sistema de compresión

Código	Requerimiento
OSC-001	El sistema de compresión debe ser accionado por una persona.
OSC-002	El sistema de compresión debe estar sujeto con métodos no permanentes que permitan su sustitución y mantenimiento.
OSC-003	El sistema de compresión debe ser capaz de regresar a su posición inicial por su cuenta.

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4: Limitantes del sistema de compresión

Código	Limitante
LSC-001	El sistema de compresión debe tener un peso máximo de 55 lb.
LSC-002	El mantenimiento del sistema de compresión debe ser ejecutable con recursos disponibles en Guatemala.

Fuente: Elaboración propia

6.4. Selección del tipo de sistema de compresión

Con base en la información presentada en el Capítulo 5 acerca de los diferentes tipos de sistemas de compresión, se realizaron matrices de decisión para ponderar las categorías importantes de un sistema de compresión. Siendo la escala utilizada de 1 a 10, donde 10 significa que la característica cumple con la necesidad de ella para el proyecto y 1 que no. Por ejemplo, un 10 en el rubro de Presión significa una presión alta y constante, pero un 10 en el rubro de Costo significa un costo bajo. De igual manera, se ponderó la importancia que se dió a cada aspecto, según las necesidades de la máquina.

Considerando la puntuación obtenida en el Cuadro 5, se determinó que una prensa hidráulica es el tipo de sistema de compresión que mejor se adecúa al proyecto. Por lo que se procedió a seleccionar el tipo de prensa hidráulica a utilizar, a partir de los tipos de prensa hidráulica identificados en el marco teórico.

Cuadro 5: Matriz de decisión de sistemas de compresión

Aspecto	Peso	Prensa mecánica	Prensa neumática	Prensa hidráulica
Longitud de carrera	7	10	7	10
Magnitud de presión	10	5	6	9
Bajo costo de adquisición	7	8	3	4
Facilidad de mantenimiento	6	10	5	7
Despliegue de información de funcionamiento	4	1	7	7
Intensidad de sonido	2	4	6	7
TOTAL		248	200	272

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 6: Matriz de decisión de sistemas hidráulicos

Aspecto	Peso	Gato hidráulico	Cilíndro hidráulico + bomba hidráulica
Longitud de carrera	7	5	10
Magnitud de presión	10	10	10
Bajo costo de adquisición	7	10	1
Facilidad de mantenimiento	6	10	5
TOTAL		265	207

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4: Gato hidráulico tipo *bottle jack*



Fuente: (Parkerbrand, 2020)

Utilizando la mayoría de los criterios empleados en el Cuadro 5, en el Cuadro 6 se definió que se utilizaría un Gato hidráulico tipo *bottle jack* como elemento generador de presión, como el que se observa en la Figura 4. La principal ventaja de utilizar un cilindro hidráulico junto a una bomba hidráulica, sería que estos se fabrican a la medida, por lo mismo, su precio es tan elevado. Esto se cotizó en la empresa Hyseals S.A., en donde los precios por el sistema hidráulico completo ascendía a los Q2,500, aún con un tonelaje bajo. Mientras que los gatos hidráulicos tipo *bottle jack* presentan precios proporcionales a su tonelaje, pero cuentan con carreras cortas y tonelajes definidos. Siendo el de 2 toneladas la presentación comercial con menor tonelaje y la carga máxima que soporta la estructura de la máquina, por lo que se utilizó un gato hidráulico marca Torin Big Red Jacks de 2 toneladas.

Cuadro 7: Matriz de decisión de tipos de prensas hidráulicas

Aspecto	Peso	Prensa en C	Prensa de doble montante	Prensa de cuatro columnas
Complejidad de construcción	8	2	10	6
Magnitud de presión	10	5	10	7
Bajo costo de adquisición	6	5	8	6
Facilidad de acceso al producto	10	9	7	10
Accionamiento automático	5	10	2	7
TOTAL		236	308	289

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los resultados del Cuadro 7, se decidió construir una prensa de doble mon-

tante. Aunque, por tener calificaciones similares, se agregaron características de una prensa de cuatro columnas, considerando la aplicación, los objetivos de los demás módulos y los objetivos de la máquina.

Una vez definidos las condiciones base del sistema de compresión, se procedió a diseñar los componentes y posteriormente, realizar la simulación de la estructura durante la operación de la máquina. Se realizaron dos iteraciones del diseño del sistema de compresión, para efectos prácticos, se referirá a la primera versión como Diseño Preliminar, y a la segunda como Diseño Final.

6.5. Diseño

6.5.1. Factor de seguridad de diseño

Con la finalidad de mantener un parámetro de referencia que confirme que el diseño desarrollado cumpla con los requisitos de resistencia estructural y los criterios de falla, se calcularon factores de seguridad por medio de dos métodos. Los cuales se compararon con los factores de seguridad obtenidos por medio de simulaciones, buscando que los resultados de las simulaciones muestren valores superiores a los calculados. Se seleccionó el factor de seguridad mayor obtenido entre ambos métodos.

Factor de seguridad según el material

Según Mott (2006), para materiales dúctiles como los metales considerados durante el diseño de este sistema, se deben definir las características de la carga a la que estarán sometidos y la confiabilidad de los cálculos de diseño. Considerando que la carga que se aplicará es estática y conocida, se categorizó como Carga estática con alto grado de confianza en cálculos de diseño", definiendo un factor de seguridad según el material de $n = 1.5$.

Factor de seguridad según "La clásica regla de dedo"

Según Ullman (2010), "La clásica regla de dedo del factor de seguridad", requiere la definición de diferentes características del diseño, asignando un factor de seguridad a cada una y multiplicándolos para obtener un factor de seguridad global, como se observa en la Ecuación 1.

$$n = n_{Material} * n_{Esfuerzo} * n_{Geometria} * n_{AnalisisDeFallas} * n_{Confiabilidad} \quad (1)$$

En el criterio de material se definió un factor de seguridad de 1, debido a que se conoce con seguridad las características y propiedades del material a utilizar. En cuanto al esfuerzo, se utilizó un factor de seguridad 1.1 considerando que las fuerzas dentro del sistema se encuentran definidas por cada componente y los esfuerzos son estáticos. Para la geometría se seleccionó un factor de seguridad de 1.2, ya que las dimensiones del diseño no se ajustan a

una tolerancia. Luego, para el criterio del análisis de fallas se consideró que al ser los esfuerzos uniaxiales y repetitivos debido a las constantes compresiones, el factor de seguridad es de 1.2. Por último, se tomó un factor de seguridad de 1.2 para el criterio de confiabilidad, asegurando una confiabilidad de 92 a 98 %, tomando en cuenta que el diseño debe ser capaz de soportar los esfuerzos y evitar daños a sí mismo y a los demás módulos.

Utilizando la Ecuación 1, se calculó un factor de seguridad global de $n = 1.9$. Al ser este mayor que el factor de seguridad según el material, se definió como el factor de seguridad global del diseño.

6.5.2. Diseño preliminar

Orientación del sistema hidráulico

En la Figura 4 se observa la posición de funcionamiento común de un gato hidráulico. Se consideró rotarlo para que el área de apoyo sobre la parte superior de la estructura de la máquina fuera mayor. Esto implica realizar una modificación al gato hidráulico, ya que al funcionar con aceite, cuando se rota, la bomba manual, que ahora se encuentra en la parte superior, no puede bombear el aceite. Por lo que se identificaron dos opciones para utilizar el gato hidráulico al revés. La primera opción es llenar completamente de aceite el cilindro y colocar una manguera que lo une a un depósito externo, permitiendo que entre aceite para extenderse y que salga para retraerse. La segunda opción es desarmar el gato y colocar un pequeño tubo o manguera metálica que permita que la bomba manual alcance el aceite del lado inferior del cilindro cuando este se encuentra al revés. Además, al rotar el gato hidráulico, cambia el accionamiento del sistema, ya que inicialmente, se empujaba el accionador hacia abajo. Tras la modificación, el accionador debe ser empujado hacia arriba.

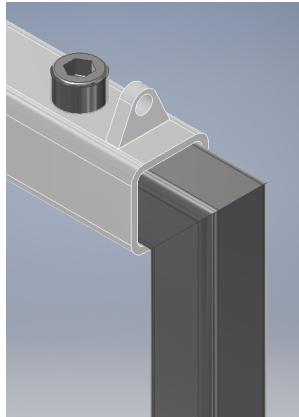
Contacto con la estructura

Para asegurar que el contacto del gato hidráulico con la estructura se encontraba alineado horizontalmente, se agregó una placa que permitiera sujetarlo a los perfiles superiores de la estructura de la máquina.

Cantidad de moldes

Considerando que se buscaba acelerar el proceso de fabricación de los ladrillos, se diseñó una estructura para distribuir los esfuerzos del sistema de compresión hacia varios moldes equidistantes. Inicialmente se planteó utilizar cuatro moldes. Estos diseños fueron descartados debido que el costo para producir esta cantidad de moldes sería muy alto, por lo que se redujo la cantidad de moldes a dos. Esto no solo redujo costos al disminuir la cantidad de material, sino que también simplificó los pasos posteriores al diseño.

Figura 5: Columnas compresoras - Diseño preliminar



Fuente: Elaboración propia.

Sistema de retorno

El gato hidráulico no es un cilindro de doble efecto, por lo que el vástago no cuenta con la capacidad de retraerse automáticamente al liberar la presión del cilindro. Para agregar esta función al sistema de compresión, se implementaron resortes de extensión sujetos a la estructura que distribuye los esfuerzos a los moldes y a los perfiles superiores de la estructura de la máquina. Los resortes poseen la capacidad de soportar el peso del gato hidráulico y de la estructura que distribuye los esfuerzos a los moldes, además de extenderse al menos la misma longitud que la carrera máxima del gato hidráulico.

Perfiles para la construcción de la estructura que distribuye los esfuerzos a los moldes

Para el diseño preliminar se consideró que el módulo de sistema de calentamiento y molde planeaba extraer el ladrillo de plástico compactada sin la apertura de los moldes, expulsándolo hacia arriba. Esto creó la necesidad de contar con un espacio más amplio sobre los moldes. Para esto se diseñó una estructura que permitiera retirar las columnas compresoras para habilitar el espacio sobre los moldes para la extracción del ladrillo. También se tomó en cuenta la disponibilidad de material dentro de la Universidad del Valle de Guatemala, para reducir el costo total del proyecto. Se diseñó esta estructura con base en perfiles cuadrados de acero AISI 1018 CR de 2x2", con un grosor de 1 mm, de varias longitudes y con terminaciones cortadas en diferentes ángulos.

El diseño contaba con un perfil horizontal en donde recaería el esfuerzo generado por el gato hidráulico y dos columnas compresoras que constaban de dos perfiles soldados en L que se introducirían en el perfil horizontal y se sujetarían con un perno, como se observa en la Figura 5. Al retirar el perno, las columnas en L se podrían extraer, despejando el espacio para la explosión del ladrillo de plástico compactado.

Se identificaron las siguientes complicaciones:

- a. Las soldaduras necesarias para unir los perfiles podrían deformarlos, lo que generaría inestabilidad al realizar la compresión del plástico debido a que estos estarían desalineados.
- b. No se logró consolidar un método para acoplar los cierres de los moldes con este tipo de perfiles, sin dañar la integridad estructural de estos.
- c. Al utilizar estos perfiles, la estructura no tendría la capacidad de extenderse. Considerando los requerimientos de tamaño del módulo de carcasa y estructura, esto restringe la longitud de las columnas compresoras a ser fija.

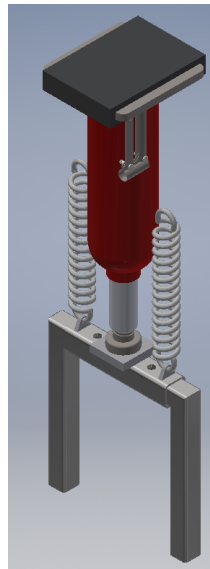
Separación entre moldes

A partir de la distancia entre moldes definida por los módulos de carcasa y estructura, y sistema de calentamiento y molde, se diseñaron el perfil horizontal y las columnas compresoras de manera que la separación entre sus centros fuera de 185 mm.

Longitud de las columnas compresoras, extensiones y la carrera efectiva

Como se observa en la Figura 6, las columnas compresoras no cuentan con una extensión a su longitud, por lo que tienen una longitud fija de un mínimo de la mitad de profundidad del molde, lo que obligaría a que el gato hidráulico tuviera una carrera de al menos 226 mm, para cumplir con los requerimientos de los demás módulos.

Figura 6: Diseño preliminar del sistema de compresión



Fuente: Elaboración propia.

6.5.3. Diseño final

A partir del diseño preliminar mostrado en la Figura 6 se aplicaron varias mejoras en cada uno de los puntos vistos en la sección anterior.

Orientación del sistema hidráulico

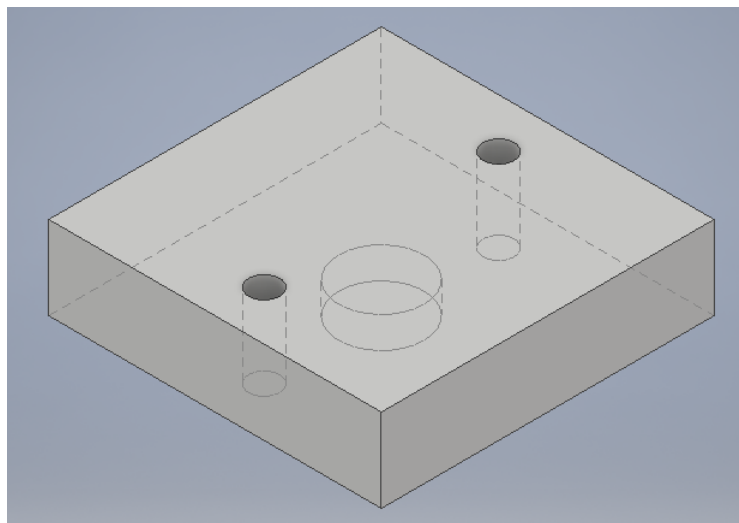
Debido a la complejidad de ambos ajustes necesarios para voltear el gato hidráulico como se mencionó en la Sección 6.5.2 se optó por no modificar el gato hidráulico y mantenerlo en su posición habitual. Por lo cual se diseñó una pieza de aluminio para encajar el extremo del vástago y aumentar el área de apoyo sobre los perfiles superiores de la estructura de la máquina. Además, de esta manera el gato hidráulico se apoya en su totalidad sobre la estructura que distribuye los esfuerzos a los moldes.

Contacto con la estructura

Debido a que el extremo del vástago del gato hidráulico posee un área pequeña, el esfuerzo que genera sobre la estructura es alto y en un área reducida. Con el objetivo de aumentar el área de contacto, se diseñó un conjunto de pieza que también permiten encajar el extremo del vástago y aseguran que se mantenga verticalmente alineado. Se utilizó barra rectangular para la pieza de la Figura 7 y barra redonda para la pieza de la Figura 8. Estas se unieron por medio de presión, tomando en cuenta que hay interferencia entre ellas.

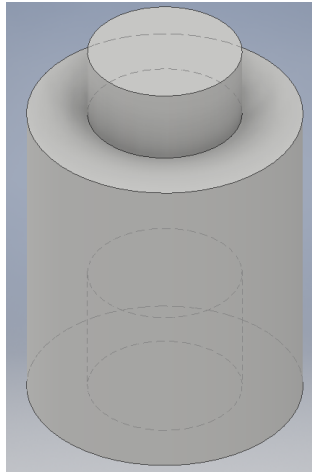
Como se observa en la Figura 9, la superficie superior de la pieza cuadrada es la que se encuentra en contacto con la estructura de la máquina. Esta se sujetará a la estructura de la máquina por medio de las mismas armellas que sujetarán los resortes del sistema de retorno.

Figura 7: Contacto con la estructura de la máquina



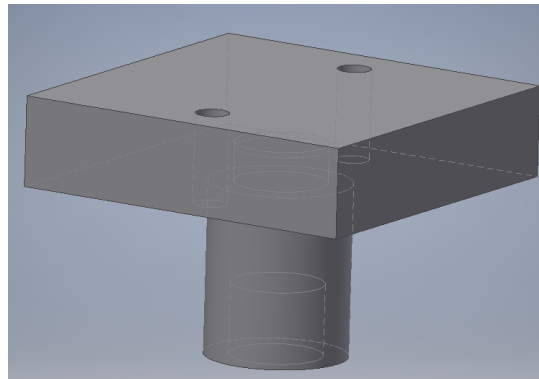
Fuente: Elaboración propia.

Figura 8: Elemento guía para el vástago del gato hidráulico



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9: Conjunto que alinea el gato hidráulico verticalmente



Fuente: Elaboración propia.

Cantidad de moldes

A partir de lo mencionado en la Sección [6.5.2](#), se mantuvo la misma cantidad de moldes para el diseño final.

Sistema de retorno

Se mantuvo el mismo sistema de retorno mencionado en la Sección [6.5.2](#). Para la implementación de los resortes fue necesario considerar la carga máxima que estos podrían soportar y la deflexión máxima. Los resortes se pudieron comprar a la medida con varios proveedores, pero esto implicaba un costo y tiempo de espera muy altos. Por esto, se com-

praron resortes de extensión estándares marca Century de 5-3/4" (146 mm) de longitud y 1/8" de grosor del alambre y 1-1/16" de diámetro. Cuyos límites nominales de carga y deflexión son 48 lbs y 5", respectivamente.

Se utilizó la ecuación que define la fuerza aplicada sobre un resorte uniforme al ser extendido, esto se observa en la Ecuación 2

$$F = k * \Delta x \quad (2)$$

Despejando para Δx , se obtuvo la Ecuación 3

$$k = \frac{F}{\Delta x} = \frac{(48 \text{ lb} * \frac{4.4482 \text{ N}}{1 \text{ lb}})}{(5'' * \frac{0.0254 \text{ m}}{1''})} \quad (3)$$

Considerando los límites de carga y deflexión de los resortes, se utilizó la Ecuación 3 para calcular la constante del resorte a utilizar, la cual fue de $k = 1,681 \text{ N/m}$.

Cuando el gato hidráulico se encuentra retraído los resortes se estiran una distancia de $\Delta x_1 = 57.45 \text{ mm}$, mientras que cuando este se encuentra extendido, la deflexión aumenta a $\Delta x_2 = 130.75 \text{ mm}$. Utilizando la Ecuación 2, el valor de la constante del resorte y las deflexiones de los resortes, se calcularon las fuerzas que ejerce cada resorte sobre las armellas de la barra horizontal del sistema de compresión y sobre la estructura de la máquina en cada escenario. Se calculó una fuerza de $F_1 = 96.6 \text{ N}$ a un ángulo de 62.2° respecto a la horizontal, cuando el gato hidráulico está retraído y de $F_2 = 219.8 \text{ N}$ a un ángulo de 69.9° , cuando se encuentra extendido.

Perfiles para la construcción de la estructura que distribuye los esfuerzos a los moldes

Debido a las desventajas de los perfiles cuadrados presentados en la Sección 6.5.2 fue necesario cambiar los materiales a utilizar. Contemplando los demás materiales disponibles dentro de la Universidad, se optó por realizar el diseño final con perfiles sólidos de aluminio 6061. Se utilizaron perfiles circulares de diámetro 1-3/4" con varios largos y un perfil rectangular de 1x4" de 305 mm de largo.

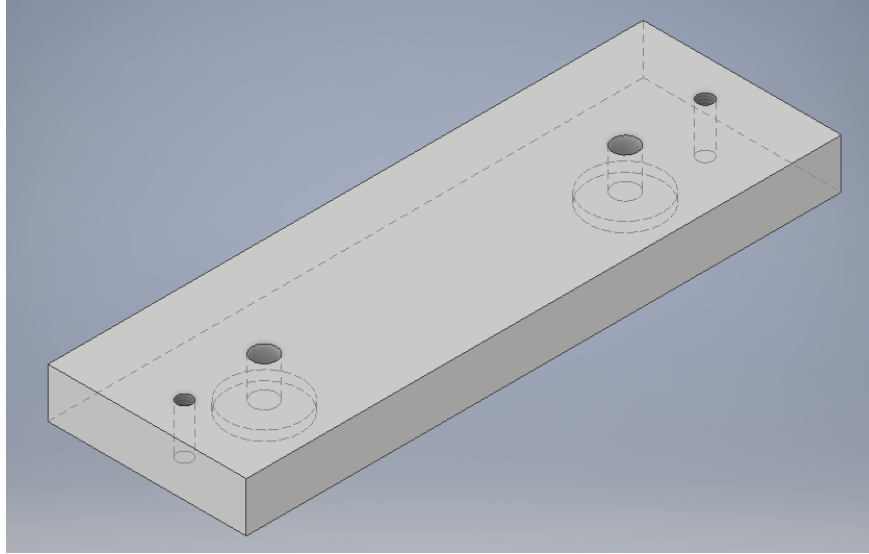
Se identificaron las siguientes mejoras respecto al diseño preliminar.

- a. No utiliza soldaduras, la unión de las piezas es por medio de tornillos y sistemas de barras roscadas.
- b. Los cierres de los moldes se pueden acoplar por medio de tornillos.
- c. Al utilizar el sistema de barra roscada se puede aumentar el alcance de la estructura, de manera que no es necesario un gato hidráulico con una carrera efectiva larga.

Separación entre moldes

Se diseñó una pieza que pudiera acoplarse a las columnas compresoras y soportar el esfuerzo generado por el gato hidráulico. Además, se le incluyó una ranura en la que se asegura que el gato hidráulico tenga una posición determinada sobre su superficie. La separación entre los centros de las columnas compresoras se mantuvo igual que en el diseño preliminar, de 185 mm.

Figura 10: Barra horizontal de la estructura



Fuente: Elaboración propia.

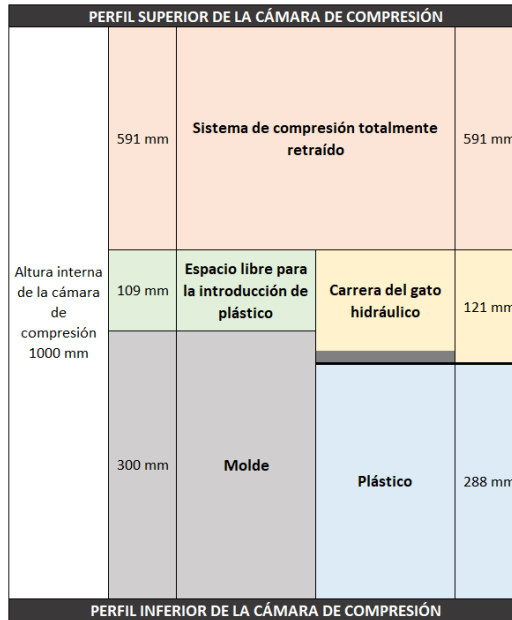
La pieza observada en la Figura 10 posee los agujeros que permiten acoplar las columnas compresoras y las armellas para los resortes. Se utilizaron armellas de $5/32''$ de diámetro con $3''$ de largo.

Longitud de las columnas compresoras, extensiones y la carrera efectiva

Un gato hidráulico con las especificaciones necesarias para cumplir con el diseño preliminar mencionados en la Sección 6.5.2 no existe a tan bajo tonelaje y en una presentación de nivel comercial. Por esto fue necesario implementar un sistema de barra roscada con los perfiles redondos de aluminio que permitiera extender la carrera efectiva del sistema, más no del gato hidráulico.

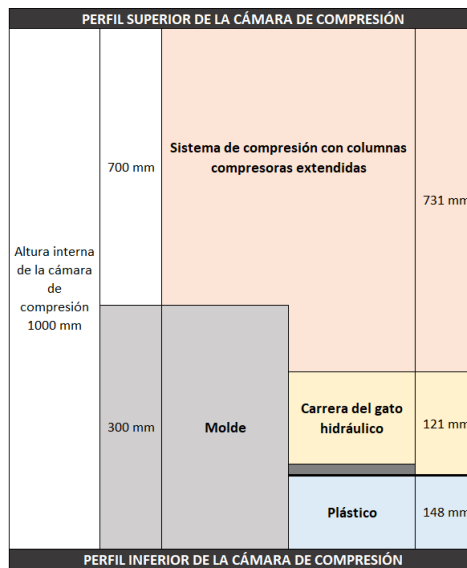
Las dimensiones de la estructura se basaron en la distribución del espacio vertical mostrado en las Figuras 11 y 12. De esta manera se pudo establecer una línea base de dimensiones para que el espacio disponible se aprovechara de manera adecuada. En ambas Figuras, la longitud del sistema de compresión incluye una pulgada (25.4 mm) adicional, la cual representa los cierres del molde que corresponden al módulo de sistema de calentamiento y molde.

Figura 11: Distribución vertical del espacio dentro de la cámara de compresión - Columnas compresoras retraídas



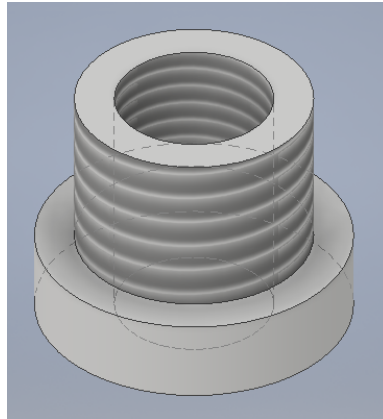
Nota: Imagen no está a escala.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 12: Distribución vertical del espacio dentro de la cámara de compresión - Columnas compresoras extendidas



Nota: Imagen no está a escala.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 13: Bushing

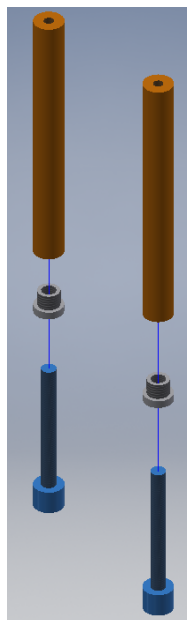


Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 13 se observan los *bushings*, cuya función es permitir el acople entre el tramo exterior y la extensión de las columnas compresoras. Al estar roscados por dentro y por fuera, evitan la necesidad de roscar el agujero interior del tramo exterior de las columnas compresoras en su totalidad.

En la Figura 14 se observa el ensamble de las columnas compresoras y sus extensiones por medio de los *bushings*. Estas piezas se unen entre sí por medio de sistemas de barra roscada.

Figura 14: Ensamble de las columnas compresoras y sus extensiones



Fuente: Elaboración propia.

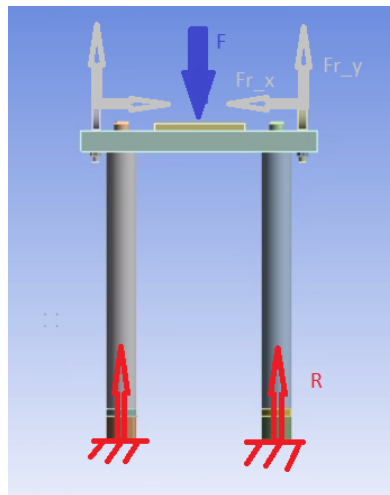
Como se mencionó en la Sección 6.3, los requisitos de tamaño en el módulo de carcasa y estructura restringieron el espacio disponible para el sistema de compresión. Por eso fue necesario determinar el alcance máximo de las columnas compresoras, de manera que permitieran el ingreso de plástico no procesado cuando el sistema estuviera totalmente retraído.

Se puede observar en la Figura 12 que para alcanzar la mayor profundidad posible dentro del molde, es necesario extender las columnas compresoras. En otras palabras, esta configuración se utiliza cuando el molde no se ha llenado con plástico comprimido. Mientras que para realizar la compresión cuando el molde se encuentra lleno de plástico comprimido, se debe utilizar la configuración mostrada en la Figura 11.

6.5.4. Simulación

La simulación se realizó para obtener resultados que indiquen si las piezas de la estructura fallarán por los esfuerzos generados durante la operación de la máquina. Se simuló el sistema de compresión, tomando en cuenta únicamente la estructura que transferirá los esfuerzos del gato hidráulico al cierre de los moldes. Toda la simulación se realizó en ANSYS 2021 R1, por medio de un análisis de elementos finitos, y utilizando el diseño final realizado en Autodesk Inventor 2019. Los resultados buscados son los siguientes. La deformación total se utilizó para comprobar si alguna pieza sufría deflexiones que pudieran sugerir una posible ruptura. Los esfuerzos de von Mises se utilizaron para determinar las piezas que sufrían esfuerzos de mayor magnitud. Por último, el factor de seguridad se utilizó para determinar si alguna pieza se encontraba subdimensionada, por lo cual podría ocasionar fallas en la estructura. Estos demuestran el comportamiento que tendrá el sistema al encontrarse en los puntos críticos de su trayectoria, utilizando los casos extremos a los que se verán expuestos los componentes. Por lo que se simularon dos situaciones. Primero, cuando las columnas compresoras se encuentran retraídas y luego, cuando estas se encuentran extendidas. Para obtener resultados válidos fue necesario configurar ANSYS con las siguientes especificaciones.

Figura 15: Diagrama de cuerpo libre de la estructura



Fuente: Elaboración propia.

Para la realización de la configuración de ANSYS para simular el sistema se utilizó el DCL que se observa en la Figura 15, como base.

Material

Para las simulaciones realizadas con el diseño final se definió el material como aluminio 6061, para las barras redondas y la barra rectangular. Se utilizó como base el material predeterminado de ANSYS, *Aluminium Alloy* el cual es una representación similar al 6061. Únicamente se ajustaron los valores de las siguientes propiedades mecánicas: resistencia a la fluencia $S_y = 276$ MPa, resistencia a la tensión $S_t = 310$ MPa, módulo de elasticidad $E = 68.9$ GPa y relación de Poisson $\nu = 0.33$ (MatWeb, 2021).

Tipo de análisis

En ANSYS se realizó un análisis estructural estático, debido a que se busca que la estructura soporte el esfuerzo máximo generado por las 2 toneladas proporcionadas por el gato hidráulico. Manteniendo un valor constante y sin cambios drásticos en los esfuerzos en intervalos cortos de tiempo, este tipo de análisis es el adecuado para la simulación. Luego se importó a ANSYS el diseño final de la estructura realizado en Autodesk Inventor en formato STEP. Para simplificar los cálculos y evitar errores por parte del software, se sustituyó la geometría del gato hidráulico por una placa de acero AISI 1080 CR, que simule la superficie inferior del gato hidráulico.

Contactos

El siguiente paso fue definir el tipo de contactos a utilizar entre cada pieza que compone la estructura. Debido a que ANSYS genera los contactos de manera automática como tipo *Bonded*, se revisó y modificó aquellos que fueran necesarios. El primer criterio para seleccionar el tipo de contacto entre las piezas de la estructura fue considerar si el contacto entre las superficies realmente existe. El segundo criterio fue determinar si el contacto entre ambas piezas implica que estas no deben mantenerse unidas. De ser así, se utilizó un contacto tipo *Bonded*, para simular que la unión es fija.

El tercer criterio fue determinar si el contacto entre las piezas provocaría resistencia por fricción, en cuyo caso se utilizó un contacto tipo *Frictional*, con un coeficiente de fricción de acuerdo a los materiales de ambas piezas, según Sears (2016). Cuando entran en contacto piezas de aluminio, se utiliza un factor de fricción de 1.2, cuando sea un contacto entre acero y aluminio, se utiliza 0.61. El cuarto criterio fue para definir si el contacto entre las piezas era una posibilidad, pero que no representaría una resistencia por fricción significativa, evitando que desde el punto de vista de ANSYS las piezas pudieran atravesarse entre sí; para cuyos contactos se utilizó un *Frictionless*. Por último, fue necesario determinar si ANSYS generó contactos inexistentes o innecesarios entre superficies que no deberían interactuar, por lo que estos fueron eliminados.

Calidad de los elementos

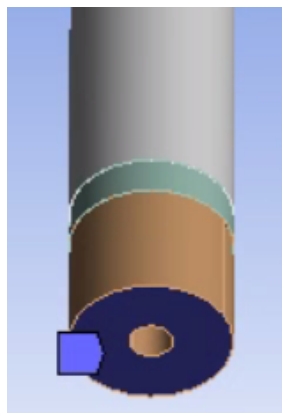
Se procedió a aplicar diferentes métodos de separación de elementos para asegurar una calidad de los elementos suficientemente alta, que permita confiar en los resultados de la simulación. Esto debido a que ANSYS realiza automáticamente la separación en elementos de todas las geometrías de la estructura, según los métodos y propiedades que se le introduzcan. Para definir una buena calidad de los elementos, se buscó obtener un *Mesh* con el valor de *Skewness* promedio más bajo posible. Para evitar sobrecargar la computadora, se intentó restringir este valor a un máximo de 0.30, el cual es un valor confiable según la Guía de Usuario para la realización del *Mesh* elaborada por ANSYS Inc. (2010). Además, al utilizar un *Skewness* tan bajo como 0.01, el análisis le tomaría una cantidad de tiempo significativa a ANSYS para computar los resultados, debido a que los elementos serían sumamente pequeños y aumentarían en cantidad.

Inicialmente se intentó aplicar diferentes métodos a la estructura con el fin de utilizar la misma separación de elementos para toda la estructura. Se utilizó un *MultiZone*, el cual provee una separación automática de diferentes tipos de geometrías, por lo que se pudo aplicar a toda la estructura, pero el *Skewness* no cumplía con el parámetro de calidad definido anteriormente. Se aplicó un *Sizing* de 5 mm, el cual redujo el tamaño de los elementos separados por el método anterior. Se logró un *Skewness* promedio de 0.26117, el cual cumple con la calidad mínima establecida.

Soportes

Se seleccionaron dos soportes, ubicados en las superficies inferiores de las extensiones de las columnas compresoras. Estos se definieron como soportes tipo *Fixed* para simular que el plástico llegó a su punto máximo de compresión, por lo que no se trasladarán verticalmente, y los moldes evitan cualquier movimiento horizontal. Estos soportes serán los encargados de simular las fuerzas de reacción. En ANSYS, los soportes se colocaron como se observa en la Figura 16.

Figura 16: Configuración de los soportes fijos

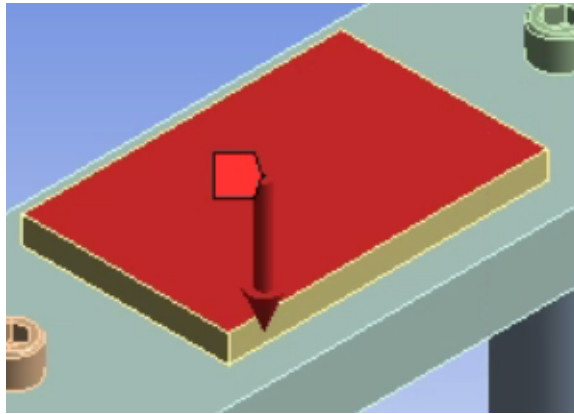


Fuente: Elaboración propia.

Fuerzas externas

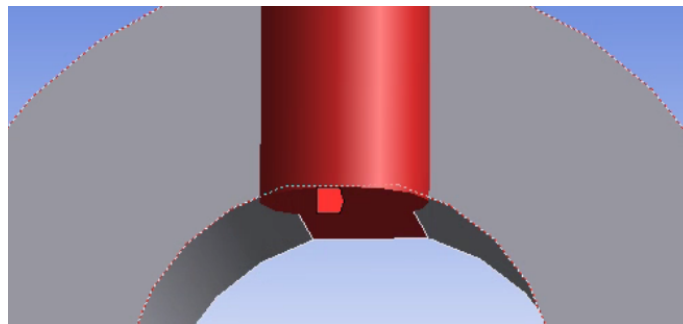
La principal fuerza externa aplicada sobre la estructura es la que proporciona el gato hidráulico. Esta se colocó distribuida en una placa que simula el área que ocupa el gato hidráulico, utilizando una magnitud de dos toneladas (19,620 N), como se observa en la Figura 17. Además, se colocaron las fuerzas ocasionadas por la extensión de los resortes, considerando sus características mecánicas previamente mencionadas en la Sección 6.5.3. Las fuerzas de los resortes se colocaron dentro de las armellas que irán sujetadas a la parte superior de la estructura, funcionando como agarradores. Para esto fue necesario seccionar un espacio en la parte interior de la argolla de la armella, como se observa en la Figura 18.

Figura 17: Fuerza generada por el gato hidráulico



Fuente: Elaboración propia.

Figura 18: Configuración de fuerzas en las armellas



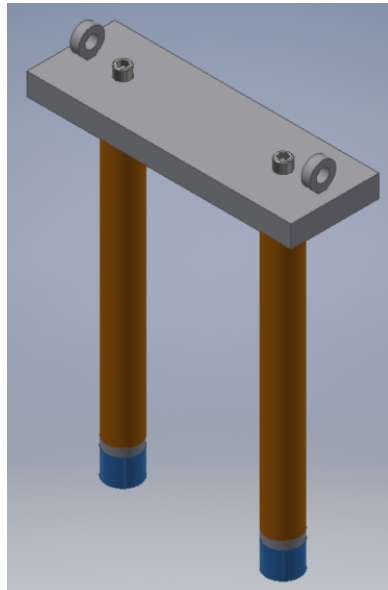
Fuente: Elaboración propia.

Escenarios simulados

Para este diseño se simularon dos situaciones, ambas cuando el gato hidráulico se encuentra totalmente extendido y el plástico se encuentra lo más comprimido posible, es decir,

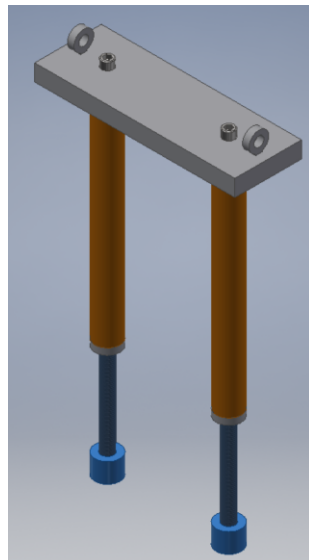
cuando la capacidad del gato hidráulico está en su límite. Primero, se simuló el escenario en el que las extensiones de las columnas compresoras se encuentran retraídas. Luego, se simuló el escenario en el que las extensiones se encuentran extendidas hasta su máximo alcance recomendado. Ambos escenarios se pueden observar en las Figuras [19](#) y [20](#).

Figura 19: Escenario 1 simulado



Fuente: Elaboración propia.

Figura 20: Escenario 2 simulado



Fuente: Elaboración propia.

Tras la validación del diseño en conjunto con los demás módulos, se procedió con el proceso de manufactura de la estructura del sistema de compresión.

6.6. Proceso de manufactura

El proceso de manufactura se realizó en su totalidad dentro del taller de manufactura de la Universidad del Valle de Guatemala. Se utilizaron las diferentes presentaciones de aluminio 6061 mencionadas en la fase de diseño y mostradas en la Figura 21, y se compraron componentes adicionales para acoplar y complementar el sistema de compresión. Se utilizaron las herramientas, las máquinas herramientas y CNC disponibles para maquinar las piezas que lo ameritaran. El material recién cortado previo a maquinar se observa en la Figura 22.

Figura 21: Material disponible en la Univerisdad del Valle de Guatemala



Figura 22: Material cortado previo a maquinar



6.6.1. Barra horizontal

El tramo de barra rectangular de 1" x 4" observada en la Figura 10 se cortó con una sierra de mano, con un largo ligeramente superior a la longitud necesaria para poder rectificar los extremos. Posteriormente, se rectificaron las superficies cortadas manualmente en una fresadora convencional, dándole el largo de 305 mm. En la Figura 23 se observa la operación de fresado en la barra rectangular.

Figura 23: Fresado del tramo de barra rectangular de 1" x 4"



Luego, se utilizó el taladro universal para realizar los agujeros para los tornillos que sujetan las columnas compresoras y las armellas; los cuales se roscaron con machos de roscado. Para los agujeros de los tornillos se utilizó una broca y macho de roscados para un diámetro de 1/2", mientras que para los agujeros de las armellas se utilizaron dichas herramientas para un diámetro de 5/16". Finalmente, se utilizó la fresa convencional para realizar el avocardado con el que se encajan las columnas compresoras, asegurando que se encuentran alineadas correctamente. La pieza manufacturada se puede observar en la Figura 24.

Figura 24: Barra horizontal manufacturada



6.6.2. Columnas compresoras

Todas las piezas de este componente se fabricaron a partir de tramos de barra redonda de 1-3/4", los cuales se cortaron con una sierra de mano en tres diferentes largos, de los cuales se cortó dos unidades de cada uno, para conformar dos columnas compresoras. Las superficies cortadas manualmente se rectificaron en un torno convencional y se les redujo la longitud hasta la distancia especificada por el diseño. Siendo el primer tramo de una longitud de 338 mm, el segundo de 30 mm y el tercero de 200 mm. En la Figura 25 se muestra la operación de torneado en la barra redonda, específicamente para taladrar agujeros en los diferentes tramos. El ensamble de este componente se observa en la Figura 14.

Figura 25: Maquinado en torno convencional de los tramos de barra redonda de 1-3/4"



Tramo exterior

Para esta pieza se utilizaron los tramos de barra redonda de mayor longitud, 338 mm. En la cara superior de la pieza se taladró un agujero, posteriormente roscado, de 1/2" de diámetro. Mientras que en la cara inferior se taladró un agujero de 7/8" de diámetro y 170 mm de profundidad. En la entrada del agujero en la cara inferior se realizó un avocardado de 1-1/8" de diámetro y 22 mm de profundidad, el cual se roscó para poder encajar el *bushing* por dentro, la cual se realizó de 10 hilos por pulgada y una entrada. Las piezas se observan en la Figura 26.

Figura 26: Tramo exterior



Bushings

Con el tramo de barra redonda de menor longitud, 30 mm, se manufacturaron *bushings*. En el taladro se realizó un agujero pasado de 3/4" de diámetro, el cual se roscó con dos hilos y 10 hilos por pulgada utilizando el torno CNC, para poder acoplarlo con las extensiones de las columnas compresoras. De igual manera, se maquinó la rosca exterior de la pieza, con un diámetro de 1-1/8" y longitud de 20 mm, para acoplarla con las columnas compresoras principales. Para la rosca exterior de la pieza se utilizaron 10 hilos por pulgada y una entrada. Mientras que para la rosca interior se utilizaron 10 hilos por pulgada y dos entradas para evitar un ajuste que presente resistencia al giro, en este caso se busca que la pieza gire fácilmente, por lo que no se utilizó una rosca estándar. Los *bushings* manufacturados se observan en la Figura [27](#).

Figura 27: Bushings manufacturados



Extensiones

Para esta pieza se utilizaron los tramos de barra redonda de longitud 200 mm. En la cara inferior se taladró un agujero de 1/2" de diámetro y 30 mm de profundidad. Para poder acoplar las extensiones con los *bushings* se maquinó la rosca exterior de la pieza, con un diámetro de 1-1/8" y longitud de 170 mm, desde la cara superior. La rosca exterior Dejando un tramo de 30 mm sin rosca exterior, precisamente donde se encuentra el agujero roscado para sujetar los cierres de los moldes con un tornillo. La rosca se realizó de la misma manera que en la rosca interior de los *bushings*.

Figura 28: Extensiones de las columnas compresoras



Contacto con la estructura de la máquina

Esta pieza se cortó de la misma manera que la Barra Horizontal mostrada en la Figura 10, dándole una longitud igual a su ancho, 4". El espacio para insertar el extremo del vástago del gato hidráulico se realizó en la fresadora, con un diámetro de 22.4 mm y una profundidad de 3/8". Adicionalmente, se manufacturó a partir de un perfil redondo de 1-3/4", la pieza que alinea verticalmente al sistema de compresión, mostrada en la Figura 8.

6.6.3. Ensamble con los demás módulos de la máquina

Carcasa y estructura

Utilizando los agujeros mostrados en la pieza mostrada en la Figura 7 se colocaron armellas que se sujetaron a los perfiles superiores de la estructura de la máquina por medio de tuercas. Las armellas utilizadas fueron de 3/8" de diámetro y 4" de largo.

Sistema de calentamiento y molde

Por medio de los agujeros roscados que se realizaron en la superficie inferior de las extensiones de las columnas compresoras, se utilizó un tornillo Allen de 1/2" de diámetro y 4" de largo para acoplar los cierres de los moldes.

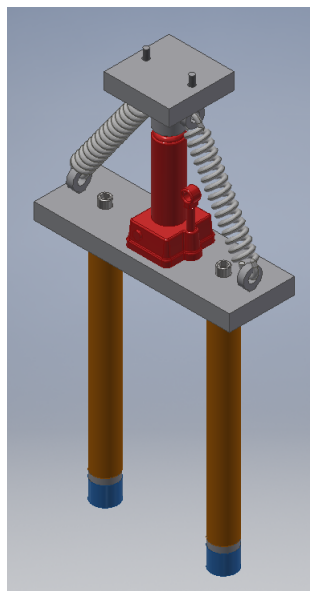
6.7. Pruebas

El protocolo de pruebas se puede observar en el Anexo 2, donde se encuentra el procedimiento y los parámetros medidos. El objetivo de las pruebas fue confirmar que se cumplió los requerimientos funcionales, operacionales y las limitantes, definidos en la Sección 6.3.

7.1. Resultados del diseño

Tras el proceso de diseño se obtuvo el diseño final mostrado en la Figura 29, el cual tiene las siguientes características.

Figura 29: Diseño final del sistema de compresión



Fuente: Elaboración propia.

Se utilizó el gato hidráulico en su posición habitual, para evitar realizar modificaciones invasivas en él para que funcione al revés.

Se diseñó un conjunto de piezas que distribuyen el esfuerzo del vástago del gato hidráulico hacia un área más amplia y que aseguran la alineación vertical del sistema de compresión.

El sistema de compresión distribuye el esfuerzo hacia dos moldes por medio de una estructura compuesta de perfiles y sistemas de barra roscada.

Se implementó un sistema de retorno que consta de dos resortes que, al liberar la válvula de alivio del gato hidráulico, ocasionan que el sistema de compresión retorne a su posición original. Los resortes deben ser de una longitud de 5-3/4", diámetro de 1-1/16" y con un grosor de alambre de 1/8".

Se utilizaron perfiles sólidos de aluminio 6061 en presentaciones rectangulares de 1"x4" y redondas de 1-3/4", las cuales se encontraban disponibles en la Universidad del Valle de Guatemala y en distribuidores locales.

Se diseñó una pieza que permite mantener la separación entre las columnas compresoras, cumpliendo con los requisitos de los demás módulos.

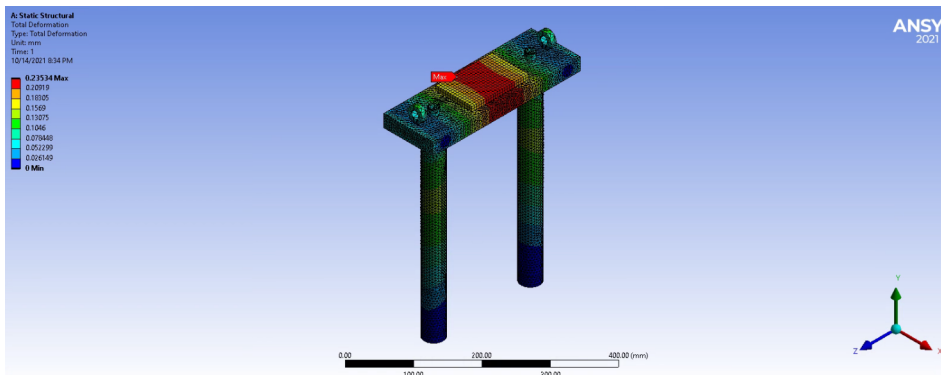
El sistema de compresión tiene una carrera total de 245.7 mm. La cual se conforma por la carrera del gato hidráulico y la longitud de las extensiones de las columnas compresoras. Alcanzando más de la mitad de la profundidad de los moldes.

7.2. Resultados de la simulación

7.2.1. Escenario 1

Como se mencionó en la Sección [6.5.4](#), el Escenario 1 ocurre cuando las extensiones de las columnas compresoras se encuentran retraídas y el gato hidráulico está aplicando su fuerza máxima sobre la estructura.

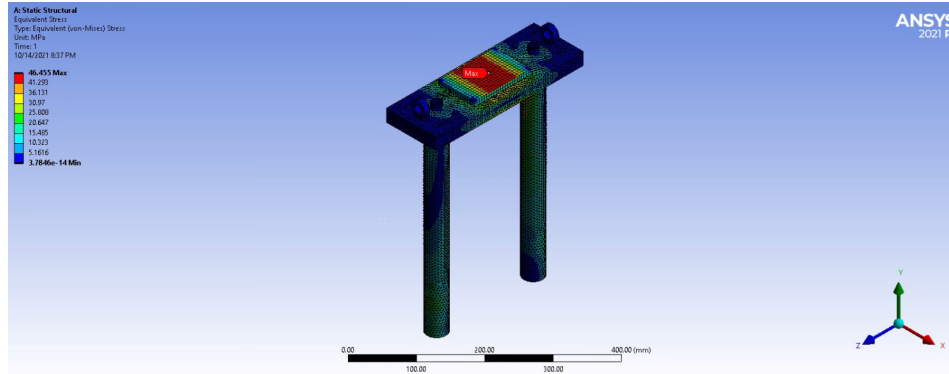
Figura 30: Resultados de deformación total en la simulación - Escenario 1



En la Figura [30](#) se observa que la deformación máxima en la estructura se encuentra

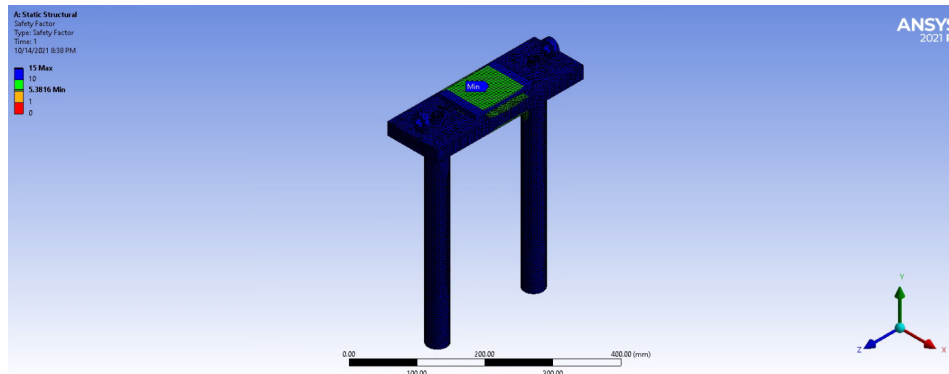
en la superficie donde se apoya el gato hidráulico, justo donde se aplica la fuerza sobre la estructura. El valor de deformación máxima es de 0.235 mm.

Figura 31: Resultados de esfuerzos de von Mises en la simulación - Escenario 1



En la Figura 31 se observa que el esfuerzo máximo se encuentra en el mismo lugar en el que se presenta la deformación máxima. El esfuerzo tiene un valor de 46.455 MPa.

Figura 32: Resultados de factor de seguridad en la simulación - Escenario 1

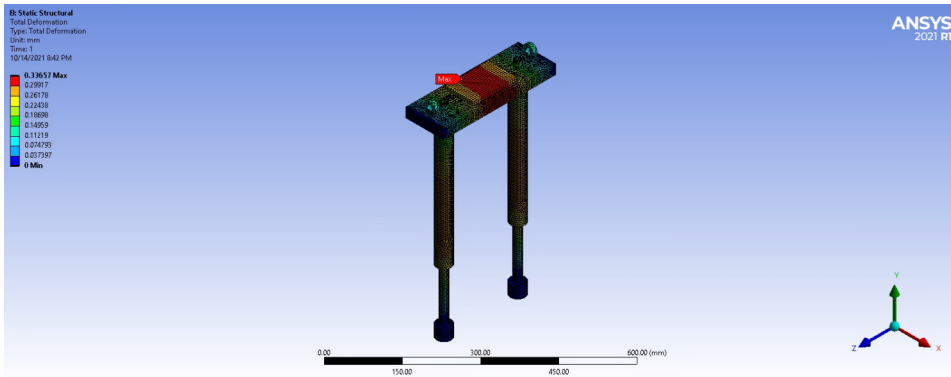


En la Figura 32 se observa que el factor de seguridad mínimo se encuentra en el mismo lugar que la deformación y el esfuerzo máximos para este escenario. El factor de seguridad mínimo es de 5.38, el cual es mayor al factor de seguridad global de diseño de 1.9, definido en la Sección 6.5.1. Esto significa que el diseño se encuentra sobredimensionado, por lo que no presentará fallas y cumple con los criterios de integridad estructural.

7.2.2. Escenario 2

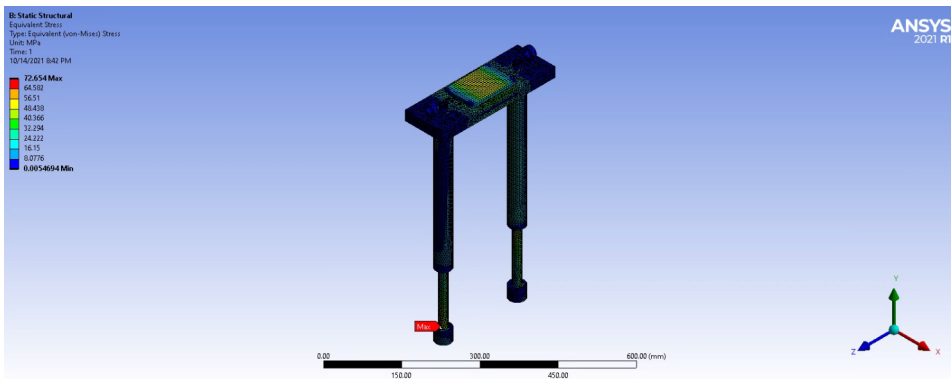
De igual manera en la Sección 6.5.4 se especifica el Escenario 2, el cual ocurre cuando las extensiones de las columnas compresoras se encuentran extendidas hasta su máximo alcance recomendado y el gato hidráulico está aplicando su fuerza máxima sobre la estructura.

Figura 33: Resultados de deformación total en la simulación - Escenario 2



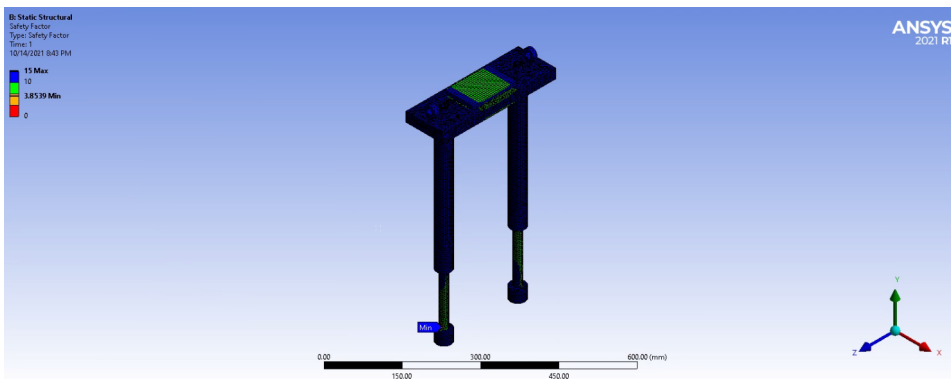
En la Figura 33 se observa que la deformación máxima en la estructura se encuentra en el mismo lugar que para el Escenario 1. Este valor de deformación máxima es ligeramente mayor al del Escenario 1, siendo de 0.337 mm.

Figura 34: Resultados de esfuerzos de von Mises en la simulación - Escenario 2



En la Figura 34 se observa que el esfuerzo máximo se encuentra en el cambio de sección de las extensiones de las columnas compresoras. El esfuerzo máximo tiene un valor de 72.654 MPa.

Figura 35: Resultados de factor de seguridad en la simulación - Escenario 2

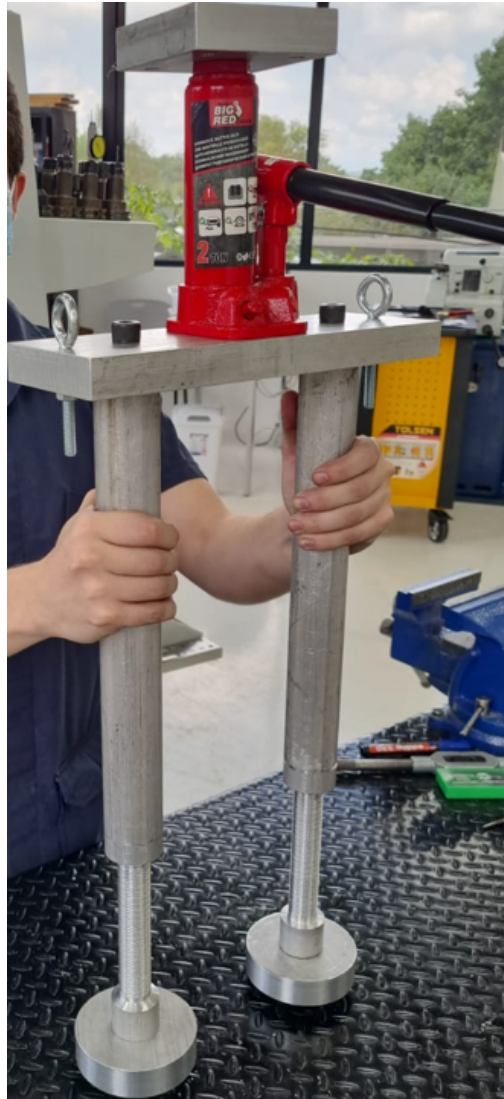


En la Figura 35 se observa que el factor de seguridad mínimo se encuentra en donde se genera el esfuerzo máximo para este escenario, y no donde está la deformación máxima. El factor de seguridad mínimo es de 3.85. Al igual que en el Escenario 1 (Sección 7.2.1), este es superior al factor de seguridad global de diseño definido en la Sección 6.5.1. Por esto, se pudo determinar que la estructura soportaría los esfuerzos y deformaciones causados por la operación de la máquina.

7.3. Resultados de la manufactura

Tras realizar el proceso de manufactura se obtuvo el sistema de compresión que se instaló en la máquina y se utilizó durante las pruebas de la máquina. En la Figura 36 se observa la estructura manufacturada previo a instalarse en la máquina.

Figura 36: Ensamble de la estructura que distribuye los esfuerzos a los moldes

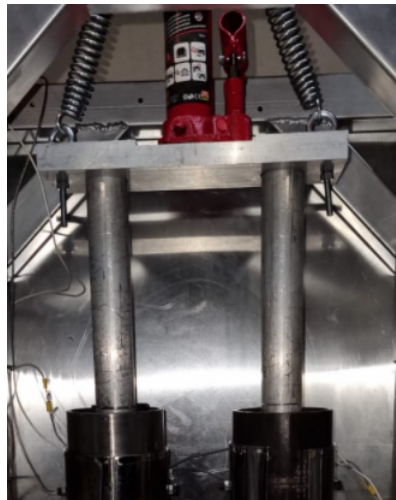


Se instaló el sistema de compresión en la máquina, como se muestra en las Figuras 37 y 38. La parte superior del sistema está sujeta a la estructura de la máquina, por medio de las piezas que alínean el sistema de compresión verticalmente. Mientras que de la superficie inferior de las extensiones de las columnas compresoras están sujetos los cierres del molde.

Figura 37: Sistema de compresión instalado en la máquina (a)



Figura 38: Sistema de compresión instalado en la máquina (b)



Para facilitar el giro para la extracción y retracción de las extensiones de las columnas compresoras, la rosca se maquinó con dos entradas y no con una rosca estándar. Esto permitió que el sistema de barra roscada no presentara un ajuste con resistencia.

La totalidad del sistema de compresión se realizó con recursos disponibles con proveedores en Guatemala.

7.4. Resultados de las pruebas

La carrera total del sistema de compresión cumple con el requerimiento, siendo esta de 240.65 mm. Esto permite que los cierres de los moldes puedan alcanzar al menos la mitad de la profundidad del molde.

El sistema de compresión comprime el plástico, ayudando a compactarlo dentro de los moldes.

En la Figura 39 se observa el resultado de las primeras pruebas realizadas, en donde se compactó únicamente hasta la mitad de los moldes.

Figura 39: Pruebas - Medios ladrillos



En la Figura 40 se observa el resultado de las pruebas cuando se buscó extraer ladrillos de tamaño completo, entre 25 y 30 cm.

Figura 40: Pruebas - Ladrillos completos



Las conclusiones que se derivaron de la planeación, desarrollo y ejecución de este proyecto son las siguientes.

1. Se diseñó, analizó y manufacturó un sistema de compresión funcional, el cual comprime el plástico PET hasta el tamaño necesario.
2. Se determinó que la opción que mejor se adapta al prototipo es un sistema hidráulico. Esto se debe a la disponibilidad de espacio debajo del sistema, los bajos costos de adquisición de los componentes y la alta capacidad del sistema hidráulico.
3. Se diseñó una estructura capaz de distribuir los esfuerzos generados por el sistema hidráulico hacia dos moldes. Esta consta de perfiles sólidos redondos y rectangulares de aluminio 6061, el cual presenta una rigidez estructural que satisface los requerimientos del módulo.
4. El sistema de compresión se ensambla y se adapta correctamente al prototipo de la compactadora en conjunto con los demás módulos. Cumpliendo con los requerimientos de los módulos de estructura y carcasa, y de sistema de calentamiento y molde.
5. La simulación realizada en ANSYS indica que los componentes del sistema de compresión soportan los esfuerzos generados durante la operación de la máquina, pues el factor de seguridad mínimo en los componentes de la máquina es de 3.85. Además, las observaciones realizadas durante la operación real de la máquina confirman los resultados de la simulación.
6. La totalidad del sistema de compresión se manufacturó y ensambló con materiales y componentes disponibles en el mercado guatemalteco.

Recomendaciones

A partir de las lecciones aprendidas de este proyecto se proponen las siguientes recomendaciones.

1. Realizar un estudio de la rigidez estructural del plástico PET cuando este se compacta y/o calienta, de manera que se tengan las características mecánicas que permitan determinar el tonelaje exacto necesario.
2. Considerando que los componentes mecánicos utilizados en la compactadora, al entrar en contacto con una fuente de calor, pueden cambiar sus propiedades mecánicas, realizar un análisis térmico en ANSYS al sistema de compresión podría reducir el deterioro de los componentes.
3. Analizar si el sistema de compactación es capaz de compactar el plástico en más de dos moldes en simultáneo. Lo cual se debe analizar en conjunto con los demás módulos de la compactadora, así como verificar que económicamente sea viable.
4. Agregar un sistema de elementos guías para alinear el movimiento vertical del sistema de compresión, y evitar el desalineamiento paralelo al suelo que pueda afectar la inserción en los moldes.
5. Realizar un análisis de resistencia a esfuerzos de compresión, tensión y torsión al ecoladrillo obtenido de la operación de la compactadora de plástico. De manera que se asegure que el ecoladrillo pueda ser utilizado como un elemento estructural en las construcciones del Centro Educativo.

- ANSYS Inc. (2010). ANSYS Meshing User's Guide.
- Castillo, D. (2018). *Análisis de la implementación de ladrillos fabricados a partir de plástico reciclado como material de construcción* (Tesis doctoral). Universidad Santo Tomás. Bogotá, Colombia.
- Esteves, A. (2003). La larga historia del prensado de metales [publisher: Industria Metal Mecánica]. <https://www.interempresas.net/Deformacion-y-chapa/Articulos/10544-La-larga-historia-del-prensado-de-metales.html>
- Maquituls. (2017). Prensas Hidráulicas: historia, usos, ventajas y desventajas. <https://www.maquituls.es/noticias/prensas-hidraulicas-historia-usos-ventajas-y-desventajas/#:~:text=La%20principales%20ventajas%20de%20la,como%20en%20las%20prensas%20mec%C3%A1nicas.>
- MatWeb. (2021). Aluminum 6061-T6. <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=b8d536e0b9b54bd7b69e4124d8f1d20a&ckck=1>
- Mohd, S. (2016). *Methodology of Press System of Compression Moulding* (inf. téc.). Universiti Malaysia Pahang. Pekan, Pahang, Malaysia.
- Mott, R. (2006). *Diseño de elementos de máquinas* (4ta Edición). Pearson Educación.
- Ortiz Beltrán, H. W. (2014). *Compactadora de bloques nutricionales para ganado, con una producción de 150 kg/h en bloques de 20x20x15 cm* (Tesis doctoral). Universidad Técnica del Norte. Ibarra, Ecuador.
- Parkerbrand. (2020). Gato hidráulico tipo *bottle jack*. <https://www.parkerbrand.co.uk/6-ton-hydraulic-bottle-jack>
- RAM. (2017a). Prensas hidráulicas bastidor tipo C. http://www.prensashidraulicas.com.mx/prensas_c.html
- RAM. (2017b). Prensas hidráulicas de columnas. http://www.prensashidraulicas.com.mx/prensas_4_columnas.html
- Sears, Z. bibinitperiod Y. (2016). *Physics for Scientists and Engineers*. Serway.
- Sonera, A., Chauhan, D. & Chaudhari, T. (2017). Design of Pneumatic Press for Bending and Punching Operation. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, 3(3).

Tipos. (2014). Tipos de prensas. <https://www.tipos.co/tipos-de-prensas/>

Ullman, D. (2010). *The Mechanical Design Process* (4ta Edición). McGraw-Hill.

Viking International Group. (2018). ¿Cómo seleccionar una prensa para su empresa?: 7 pasos básicos [publisher: Automatización, General, Servotecnología]. <https://blog.vikingroup.com/automatizacion/7-pasos-para-seleccionar-una-prensa/>

CAPÍTULO 11

Anexos

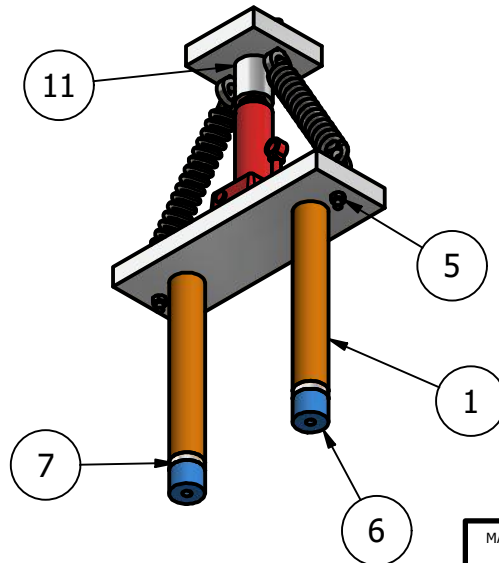
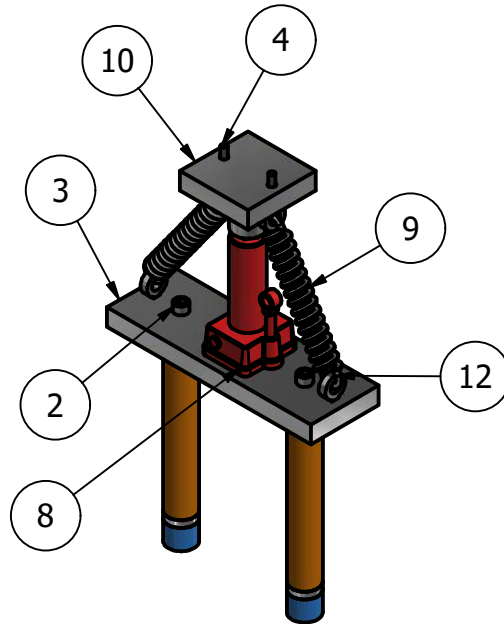
Planos del sistema de compresión

2

1

LISTA DE PARTES

ELEMENTO	CANTIDAD	NÚMERO DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	2	Columnas compresoras	Perfil de aluminio redondo de 1-3/4"
2	2	Tuercas 3/8"	Hexagonal
3	1	Barra horizontal	Peril de aluminio rectangular de 1x4"
4	2	Armellas	Diámetro 3/8" y longitud 4"
5	2	Tuercas 5/16"	Hexagonal
6	2	Extensiones de las columnas compresoras	Perfil de aluminio redondo de 1-3/4" con una sección roscada
7	2	Bushings	Perfil de aluminio redondo de 1-3/4" roscado por dentro y fuera
8	1	Gato Hidráulico	Torin Big Red Jacks. 2 toneladas.
9	2	Resortes de extensión	Century. Diámetro 1-16", longitud 5-3/4" y grosor del alambre 1/8"
10	1	Contacto con estructura de la máquina	Perfil de aluminio rectangular de 1x4" con encaje para la pieza 11
11	1	Guía para el vástago del gato hidráulico	Perfil de aluminio redondo de 1-3/4" para alinear verticalmente el sistema
12	2	Armellas	Diámetro 5/16" y longitud 3"



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

TOLERANCIAS GENERALES

LINEAL .X ± 0.1
.XX ± 0.01
.XXX ± 0.001
ANGULAR ± 0.1
FRACCIONES ± 0.01
RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓

DIBUJADO POR EDUARDO LAFUENTE
FECHA 31-08-2021

DISEÑADO POR EDUARDO LAFUENTE
FECHA 14-09-2021

REVISADO POR RONY HERRARTE
FECHA 07-11-2021

APROBADO POR RONY HERRARTE
FECHA 07-11-2021

NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO
SISTEMA DE COMPRESIÓN

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: LISTA DE PIEZAS
SISTEMA DE COMPRESIÓN

NÚMERO DE DIBUJO: SC-001

FORMATO
A

ESCALA: 1:8

UNIDADES: mm

PÁGINA 1 DE 7

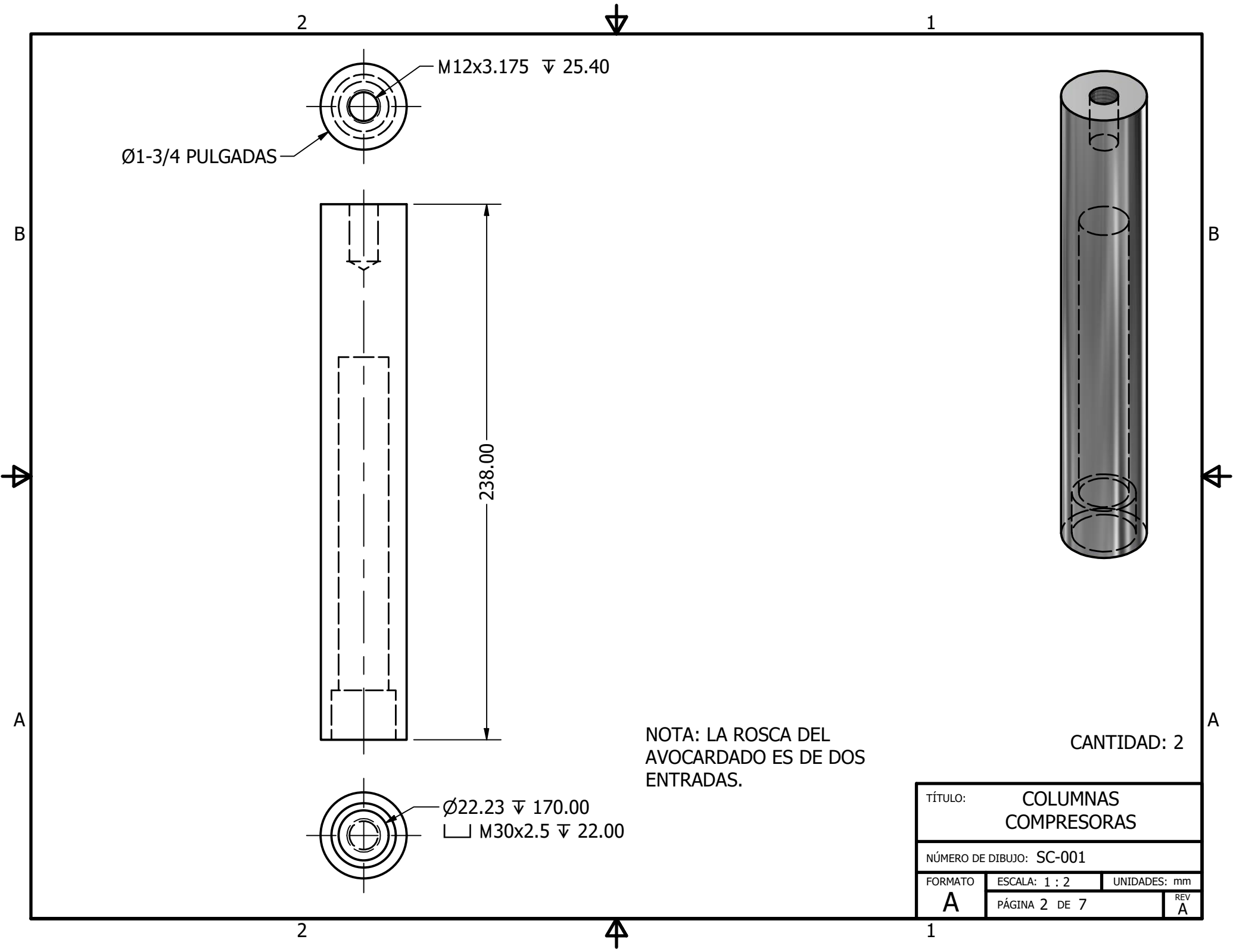
REV
A

MATERIAL
VER LP
TRATAMIENTO
NA
MASA: 8.191 kg



2

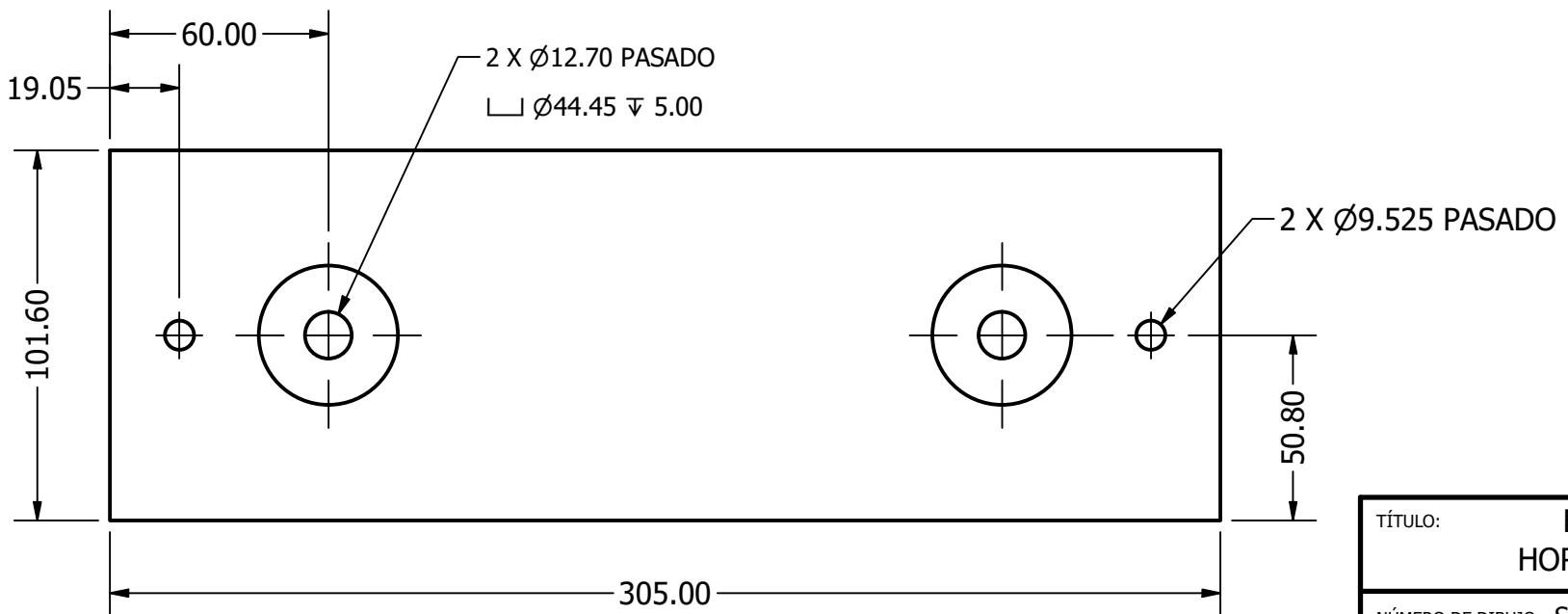
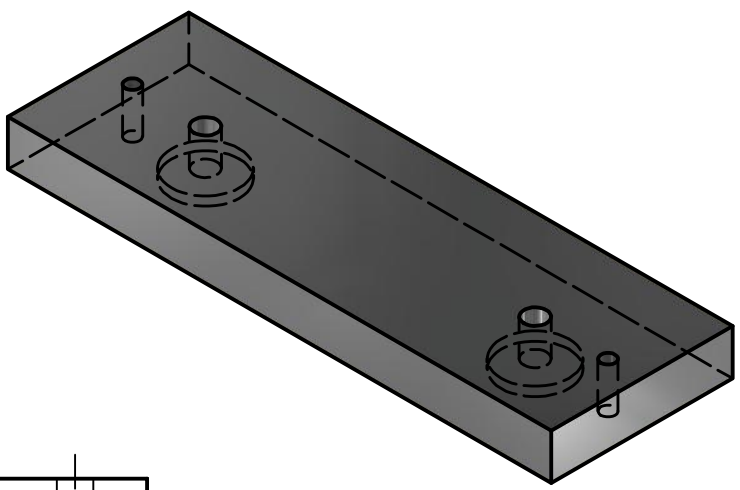
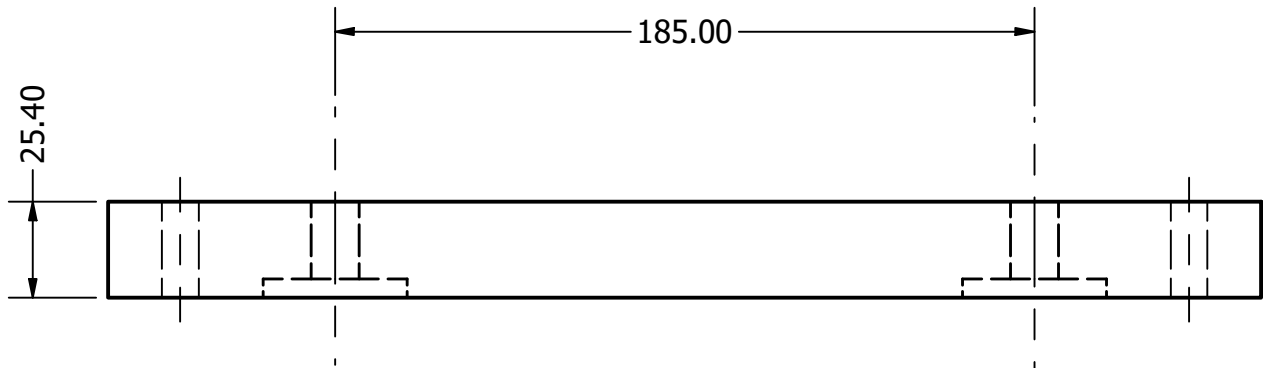
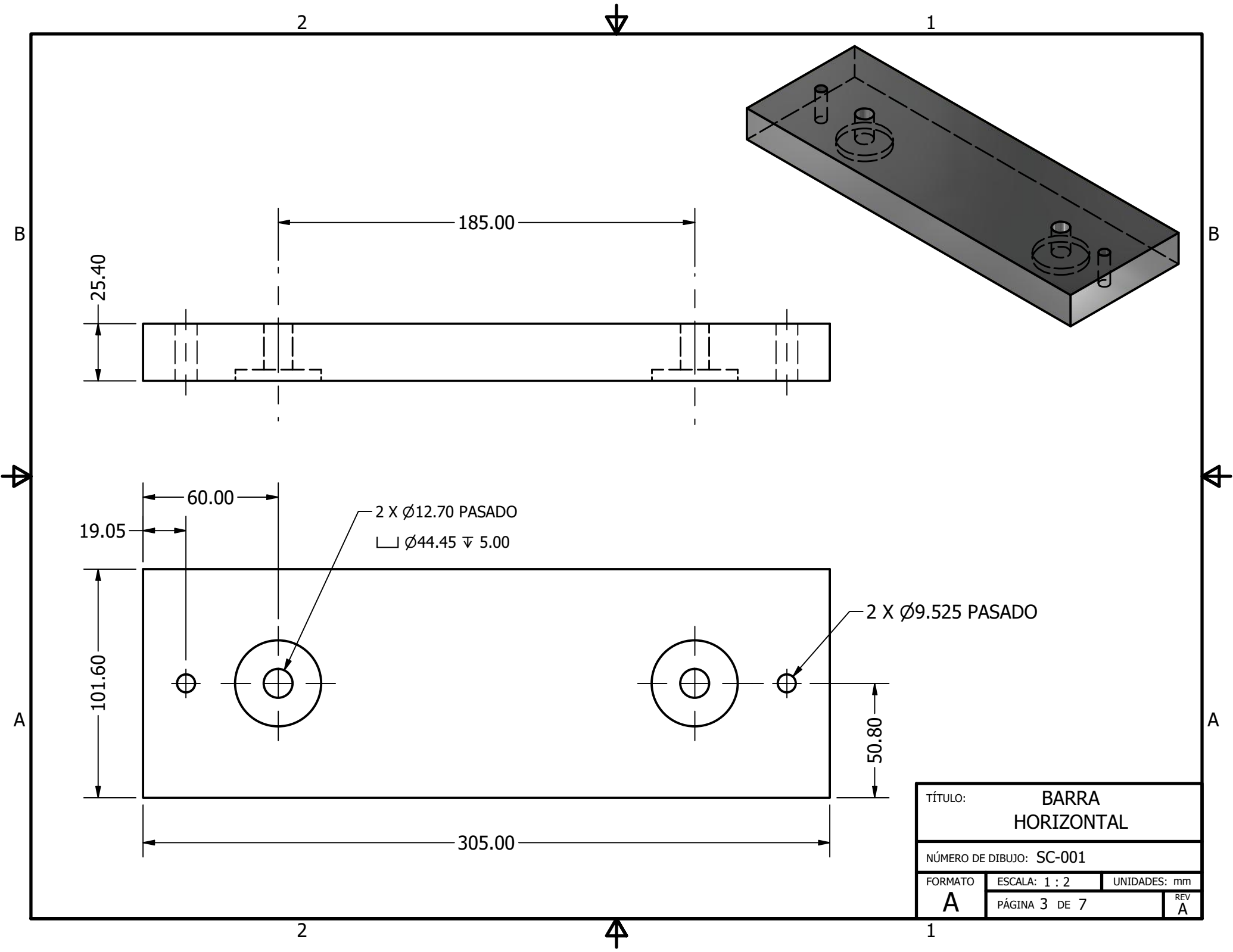
1



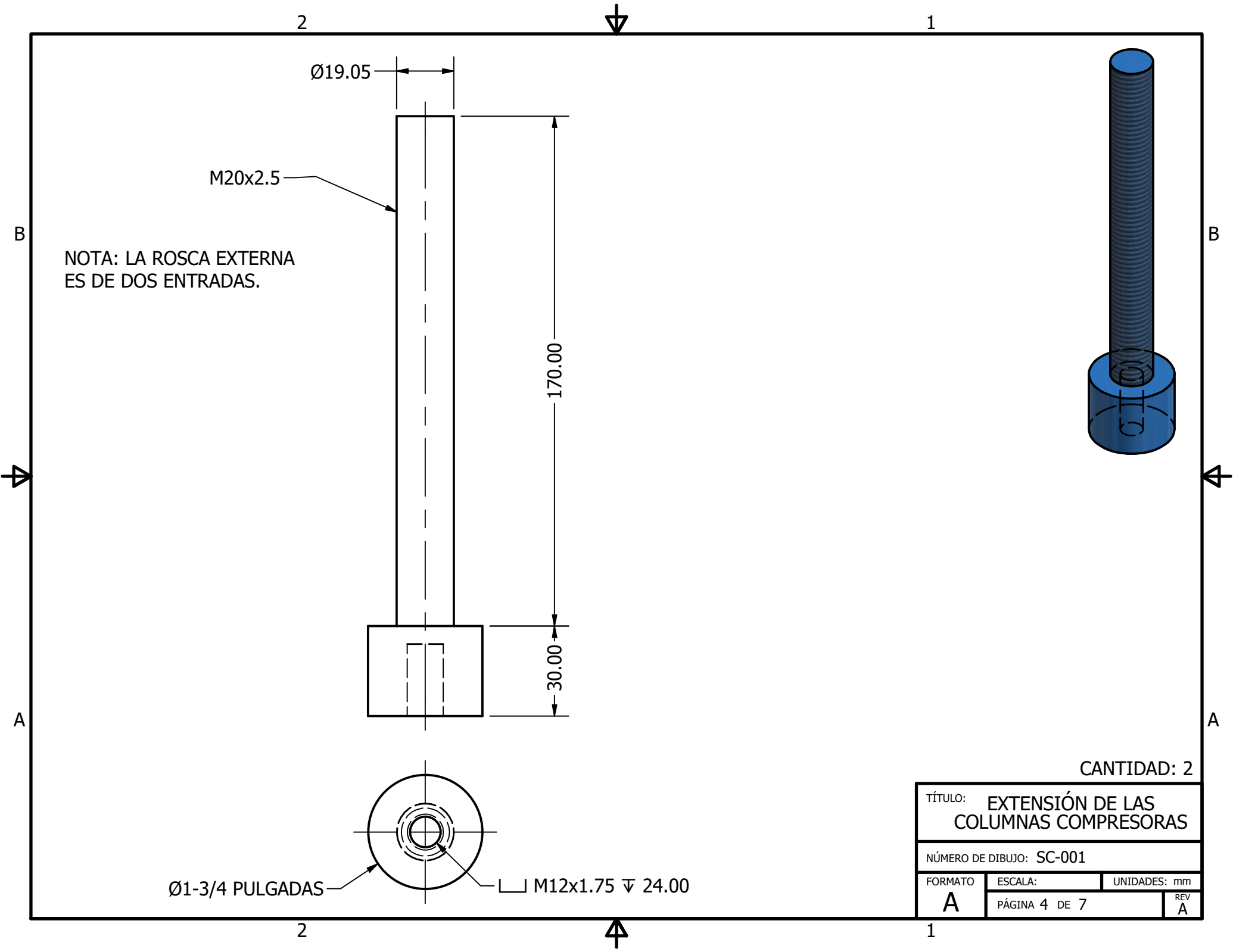
NOTA: LA ROSCA DEL AVOCARDADO ES DE DOS ENTRADAS.

CANTIDAD: 2

TÍTULO: COLUMNAS COMPRESORAS		
NÚMERO DE DIBUJO: SC-001		
FORMATO	ESCALA: 1 : 2	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 2 DE 7	REV A



TÍTULO:			BARRA HORIZONTAL		
NÚMERO DE DIBUJO: SC-001					
FORMATO	ESCALA: 1 : 2	UNIDADES: mm			
A	PÁGINA 3 DE 7			REV	A



NOTA: LA ROSCA EXTERNA
ES DE DOS ENTRADAS.

M20x2.5

Ø19.05

170.00

30.00

Ø1-3/4 PULGADAS

M12x1.75 ∇ 24.00

CANTIDAD: 2

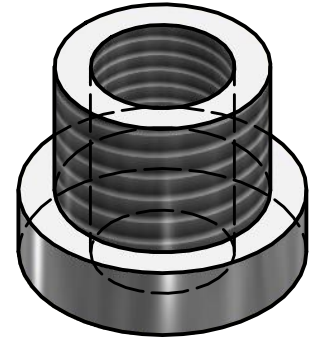
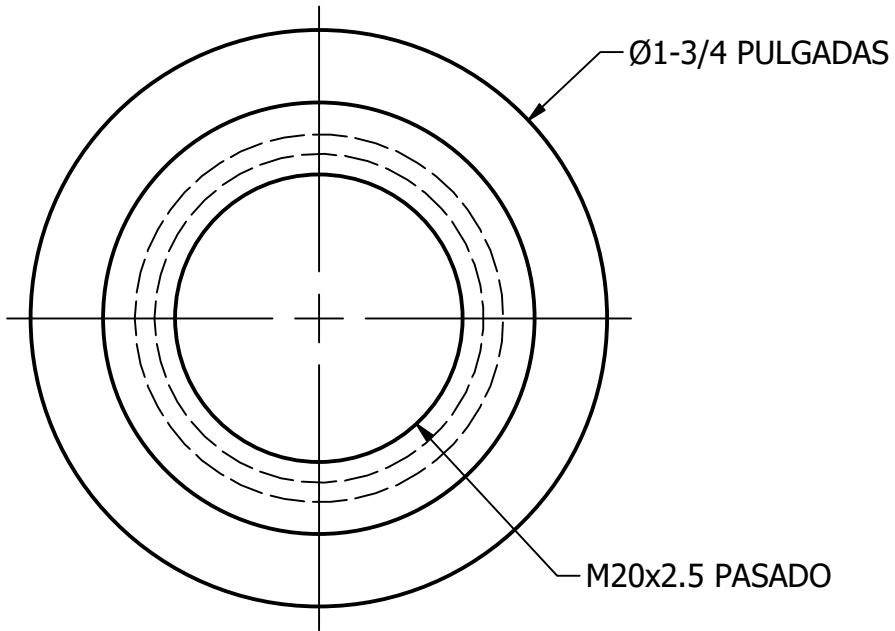
TÍTULO: EXTENSIÓN DE LAS
COLUMNAS COMPRESORAS

NÚMERO DE DIBUJO: SC-001

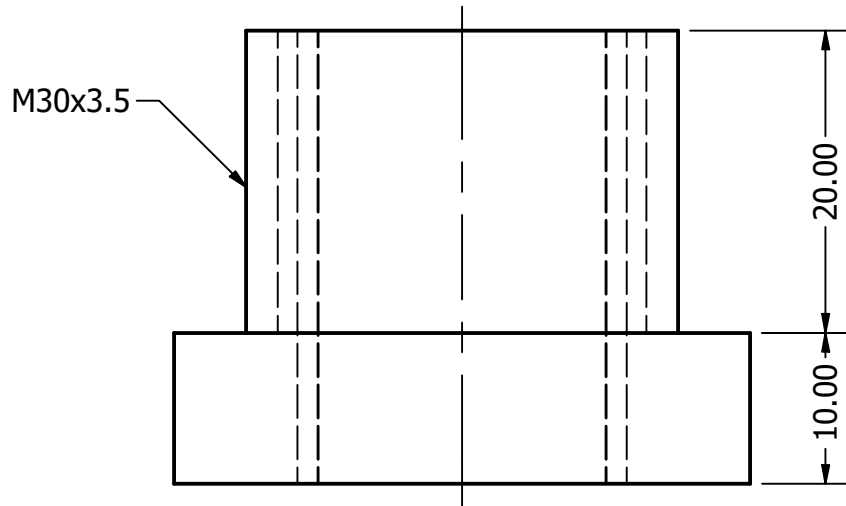
FORMATO	ESCALA:	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 4 DE 7	REV A

2

1



NOTA: LAS ROSCAS SON DE DOS ENTRADAS.



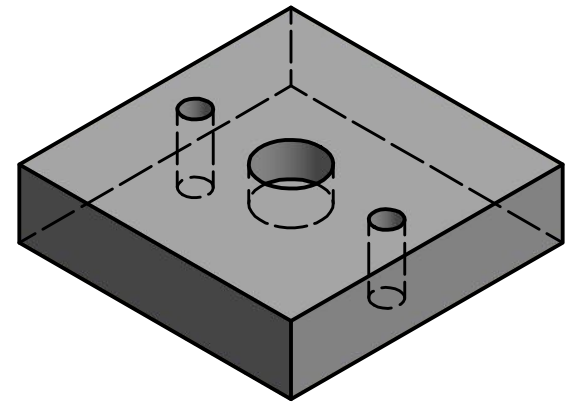
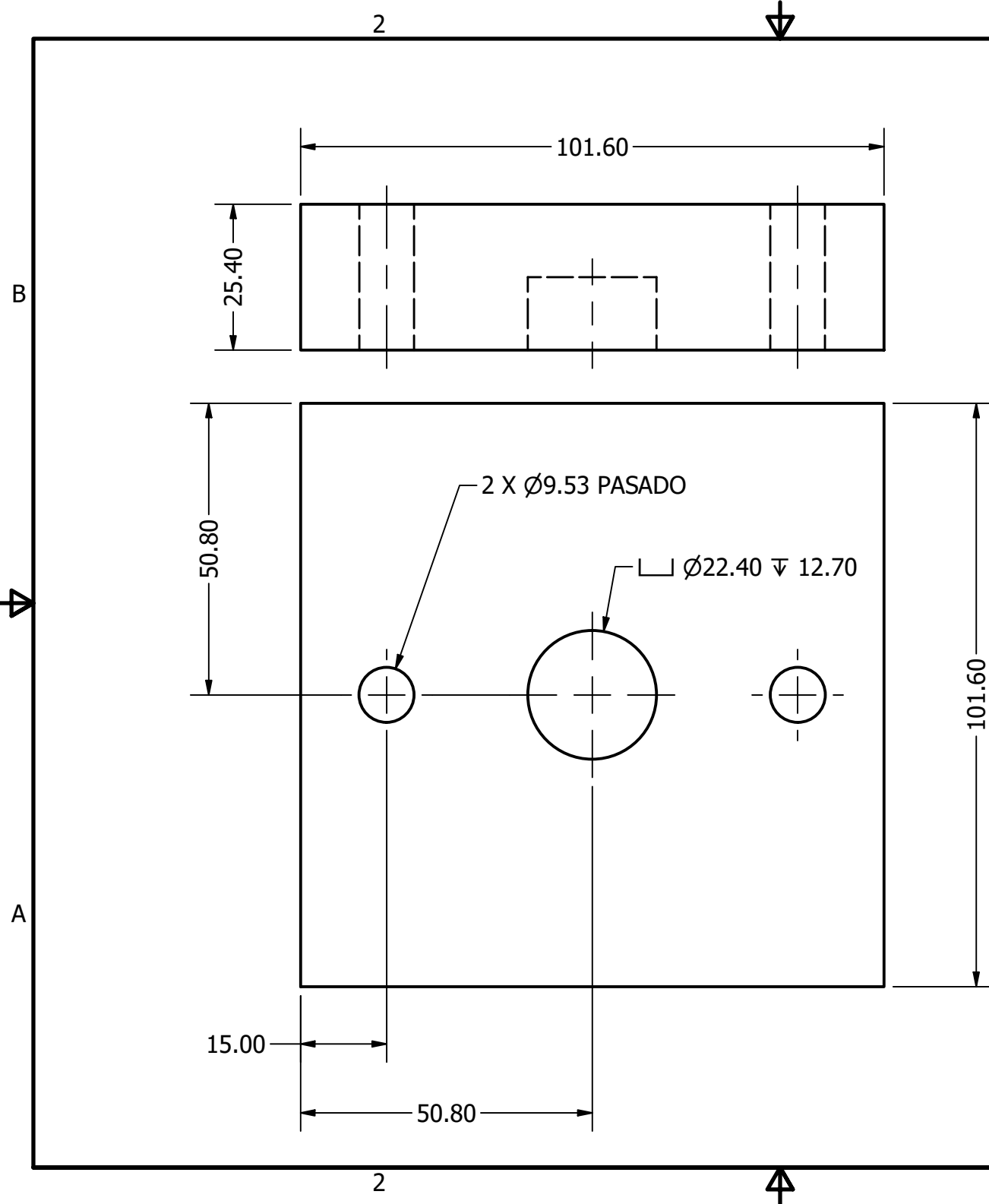
CANTIDAD: 2

TÍTULO:		BUSHING	
NÚMERO DE DIBUJO: SC-001			
FORMATO	ESCALA: 2 : 1	UNIDADES: mm	
A	PÁGINA 5 DE 7		REV A

2

1





TÍTULO: Contacto con la estructura de la máquina		
NÚMERO DE DIBUJO: SC-001		
FORMATO	ESCALA: 1 : 1	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 6 DE 7	REV A

2

1

B

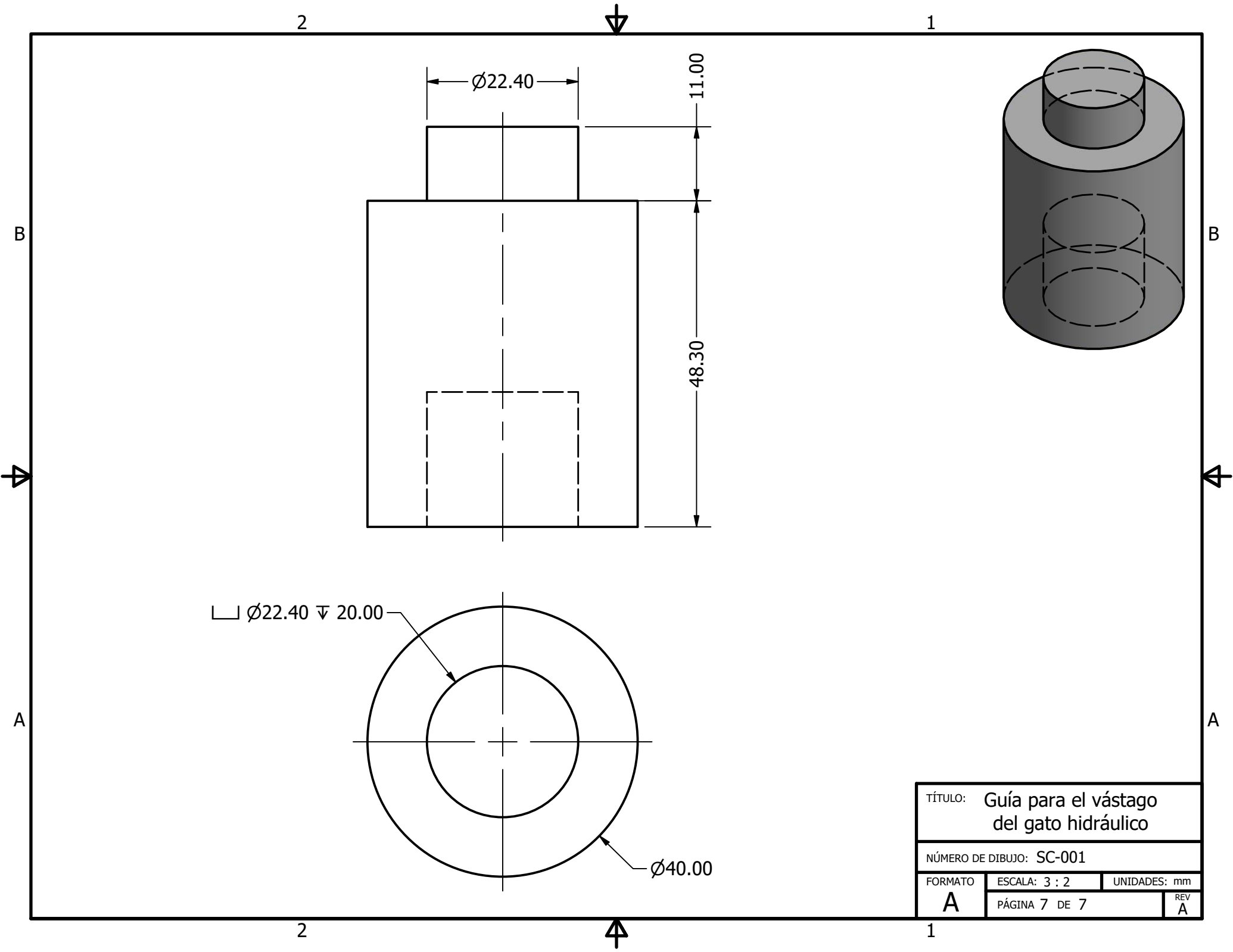
B

A

A

2

1



TÍTULO: Guía para el vástago del gato hidráulico

NÚMERO DE DIBUJO: SC-001

FORMATO	ESCALA: 3 : 2	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 7 DE 7	REV A

Protocolo de pruebas

UVG - Trabajo de graduación

Juan Diego Girón Córdón - 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 enfocarán 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 llevarán 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 será el encargado de supervisar la operación y se asegurará 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

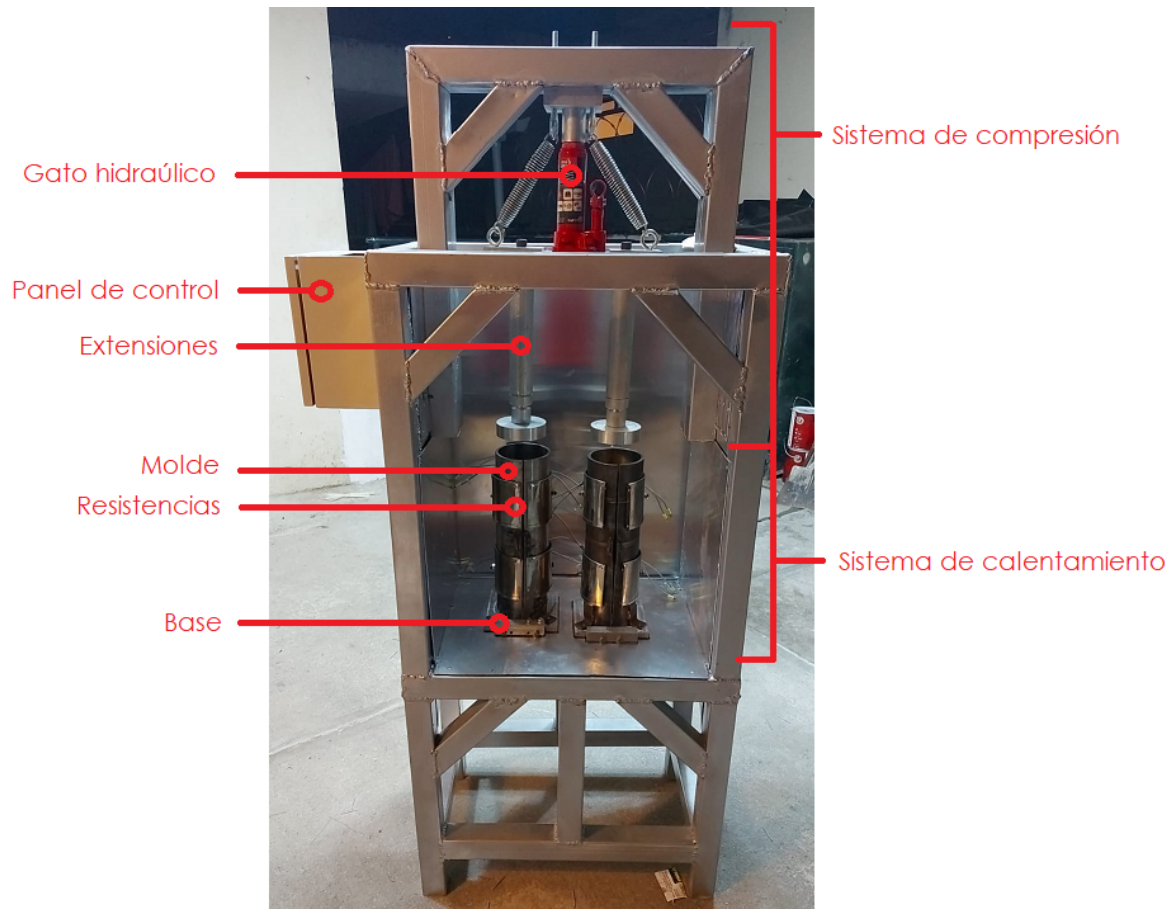


Figura 1. Esquema de la máquina

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**.

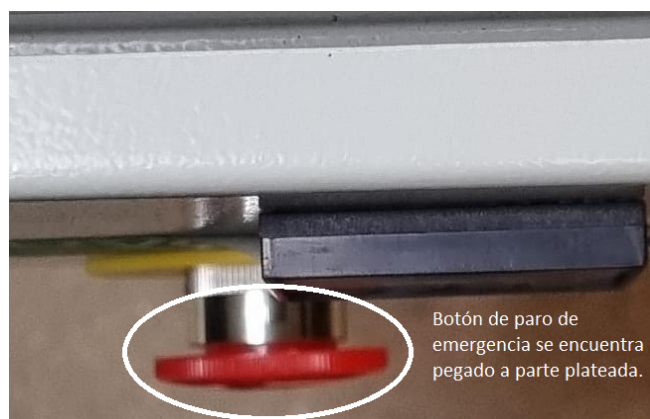


Figura 2. Paro de emergencia activado

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**.

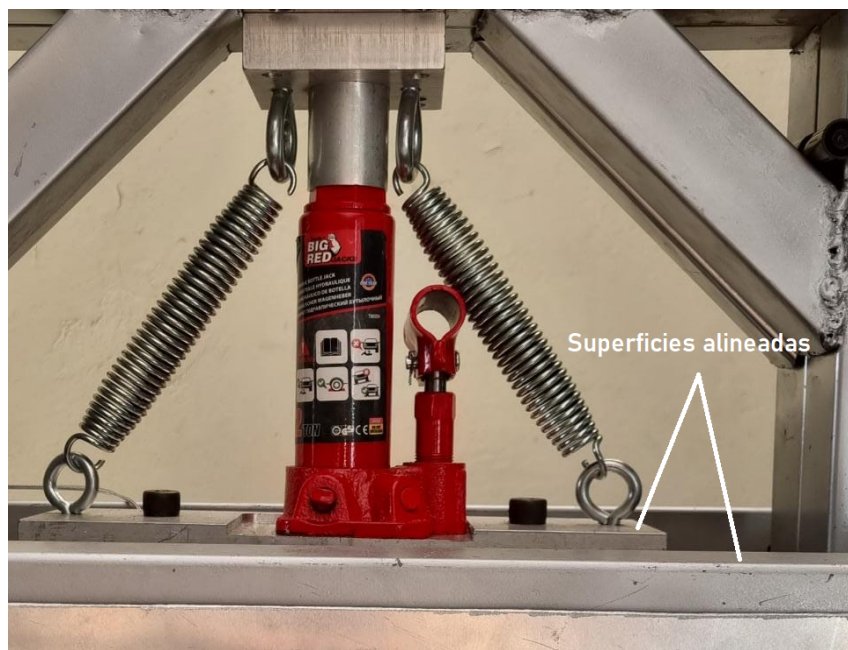


Figura 4. Posición inicial de sistema de compresión

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.

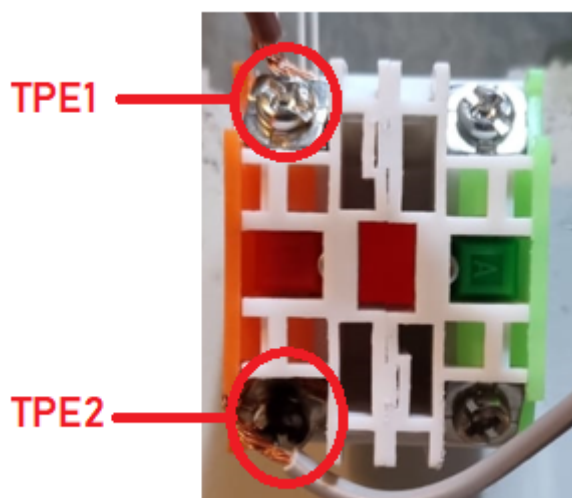


Figura 6. Terminales paro de emergencia

Tabla 1. Etiquetas que indican conexiones para paro de emergencia

Paro de emergencia	
De	Hasta
TPE1	TB2
TPE2	P

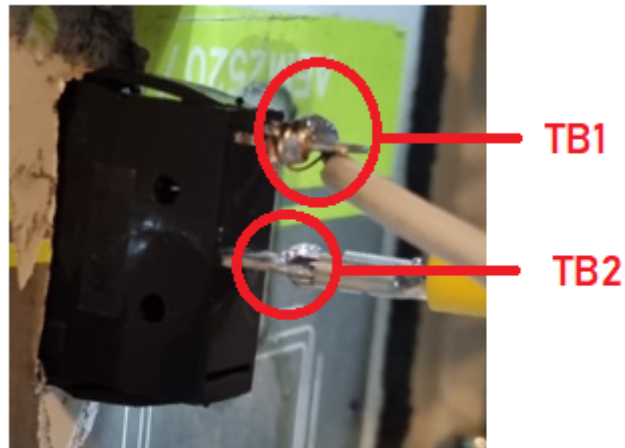


Figura 7. Terminales botón de encendido

Tabla 8. Etiquetas que indican conexiones para botón de encendido

Botón de encendido	
De	Hasta
TB1	TC1
TB2	TPE1

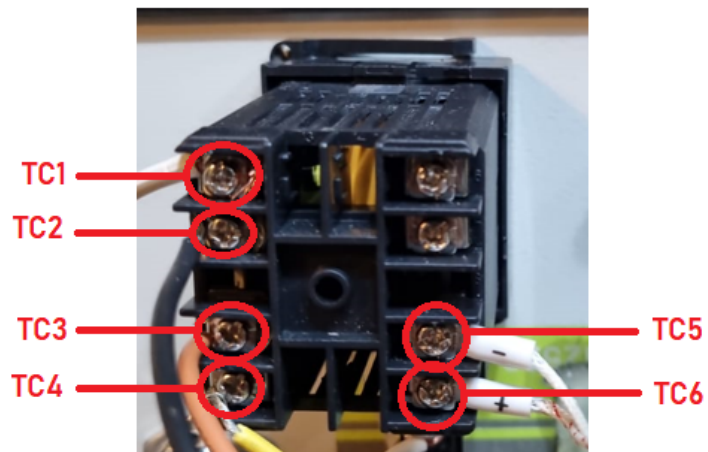


Figura 8. Terminales controlador de temperatura

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. Pesarse 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.

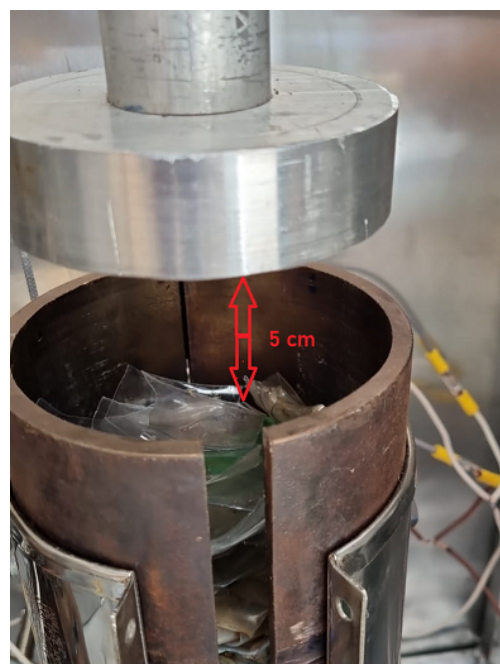


Figura 11. Nivel de llenado de molde con retazos de plástico

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**.

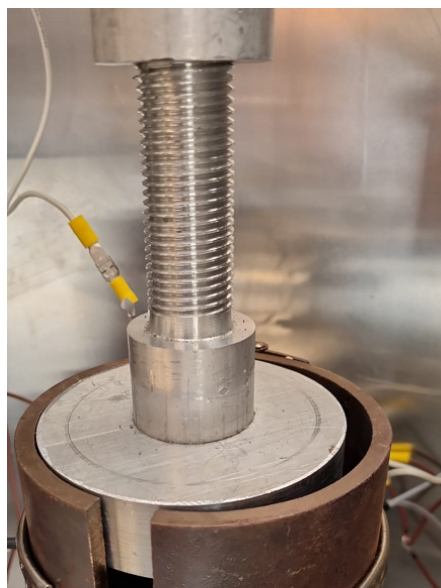


Figura 13. Disco compactador alineado con superficie superior del molde

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

Previo a la prueba (llenado completo)			
No. Prueba	No. Precompresión	Pre-calentamiento (°C)	Tiempo de pre-compresión (min)
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

Durante la prueba		
No. Prueba	Temperatura (°C)	Tiempo compresión (min)
1	180	20
1	180	20

1	180	20
1	180	20
1	180	20
1	180	20
2	180	20
2	180	20
2	180	20
2	180	20
2	180	20
3	180	20
3	180	20
3	180	20
3	180	20
3	180	20
4	180	20
4	180	20
4	180	20
4	180	20
4	180	20

Posterior a la prueba					
No. Prueba	Tiempo enfriamiento (min)	Temperatura extracción (°C)	Altura final (cm)	Tiempo de extracción (min)	Peso de ecoladrillo obtenido (g)
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