

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA INYECTORA DE
POLIPROPILENO PARA FINES ACADÉMICOS E INVESTIGATIVOS EN EL
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD DE
CÓRDOBA**



MANUEL ANTONIO NOVA ARRIETA

WENDY VANESSA PEINADO AGRESOTT

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA

MONTERÍA

2019

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA INYECTORA DE
POLIPROPILENO PARA FINES ACADÉMICOS E INVESTIGATIVOS EN EL
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD DE
CÓRDOBA**

MANUEL ANTONIO NOVA ARRIETA

WENDY VANESSA PEINADO AGRESOTT

**Trabajo de grado presentado en la modalidad de Trabajo de Investigación, como
parte de los requisitos para optar al título de Ingeniero Mecánico**

DIRECTOR

MSc. YAHIR ENRIQUE GONZÁLEZ DORIA

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MONTERÍA

2019

**La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del
proyecto, serán responsabilidad de los autores.**

Artículo 61, acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.

NOTA DE ACEPTACIÓN

YAHIR ENRIQUE GÓNZALEZ DORÍA

Director

JIMY UNFRIED SILGADO

Jurado

VALÉRY JOSÉ LANCHEROS SUAREZ

Jurado

El presente trabajo de grado va dedicado principalmente a Dios quien como guía estuvo presente en el caminar de mi vida, bendiciéndome y dándome fuerzas para continuar con mis metas trazadas sin desfallecer.

Por segundo a mis padres Antonio Roberto Nova Girón y Catalina Inés Arrieta Martínez, quienes han sido mi mayor ejemplo, mi mayor motor y motivación para alcanzar mis metas, sin reparar en esfuerzos o sacrificios.

A mis hermanas Yina y Lina que también me han motivado y confiado siempre en mis capacidades y han aportado pequeños granos de arena en todo este proceso.

A Leissy Angulo siendo mi apoyo y hasta colaboradora en la realización de este trabajo

Por último, a una de las más grandes personas que he conocido y con el cual compartí esta carrera desde el inicio, mi compañero José David Moreno Martínez Q.E.P.D.

Manuel Antonio Nova Arrieta

Primero que todo, dedico este trabajo a mis padres Libardo Peinado Silva y Bettys Agresott Medina, quienes me han educado con excelentes valores y me han apoyado desde el inicio, realizando incontables sacrificios para que pudiese cumplir mis metas y propósitos.

A mi hermano mayor Libardo por ser mi compañero de vida, a mis abuelos, a mis tíos y demás familiares que siempre han estado a mi lado y han creído en mí.

A mis amigos y colegas quienes me han mostrado su apoyo y que de una u otra forma han contribuido a que me convierta en lo que hoy día soy.

Wendy Vanessa Peinado Agresott

AGRADECIMIENTOS

Gracias a todas esas personas que de una u otra forma aportaron su granito de arena para el desarrollo y puesta en marcha de este proyecto; a nuestros padres y hermanos mayores, quienes, con su excelente educación, sus buenos valores, su amor y su compromiso hacia con nosotros, contribuyeron a que seamos las personas que hoy día somos. A los docentes del programa por ser quienes nos guiaron a través de nuestros estudios de pregrado y por la formación integral que nos brindaron

Al ingeniero Yahir González Doria por motivarnos a realizar este proyecto, por su dedicación y atención en todo el transcurso de la realización del mismo. A Jin Hae Lee López, los hermanos González López, Jhan Cañavera Caro, José David Sierra, Diego Racero Galaraga, Luis Naranjo Vásquez, Juan Humberto Sotter y Leissy Angulo Garcés quienes nos brindarnos su ayuda y su acompañamiento. A los ingenieros Jaime Villada y Marco Osorio por su inmensa colaboración en el laboratorio de materiales y procesos, al ingeniero Elkin Medellín por su asesoría brindada para la construcción de la máquina, al ingeniero Jimmy Unfried por su constante guía, al equipo eléctrico de la empresa Comfacor, a los distintos trabajadores del “taller granja industrial” y de la rectificadora “los mellos” quienes nos fueron de gran ayuda en la construcción de diversos elementos del equipo de inyección de plásticos. Finalmente, agradecer a nuestros colegas de ingeniería mecánica quienes creyeron en nosotros y nos aportaron sus conocimientos en el desarrollo del proyecto.

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	17
2.	OBJETIVOS.....	19
2.1.	OBJETIVO GENERAL.....	19
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	20
3.1.	MARCO TEORÍCO	20
3.2.	ESTADO DEL ARTE	24
4.	METODOLOGÍA	27
4.1.	CARACTERÍSTICAS Y PARÁMETROS	27
4.2.	DISEÑO ESQUEMATICO	28
4.3.	DISEÑO DE LA MÁQUINA DE INYECCIÓN VERTICAL PARA POLIPROPILENO	31
4.4.	CONSTRUCCIÓN	61
4.5.	VALIDACIÓN	61
5.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	63
5.1.	DISEÑO DE LA MÁQUINA DE INYECCIÓN TIPO VERTICAL PARA POLIPROPILENO.....	63
5.2.	CONSTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA INYECTORA DE PLÁSTICOS TIPO VERTICAL.....	93
5.3.	VALIDACIÓN	108
6.	CONCLUSIONES.....	117
7.	RECOMENDACIONES.....	118
8.	GUIA DE PRÁCTICAS	119
9.	GUÍA DE MANTENIMIENTO.....	130
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	132
11.	ANEXOS	134

LISTADO DE ANEXOS

Anexo A. Valores de la presión de inyección para algunos Polímeros obtenidos mediante la práctica.	134
Anexo B. Valores de v_t para algunos materiales poliméricos.	134
Anexo C. Valores de K para la longitud efectiva $L_e=KL$, con cuatro fijaciones de extremos diferentes.	135
Anexo D. Contenido de calor por libra de polipropileno.....	135
Anexo E. Temperatura de plastificación de distintos termoplásticos.	136
Anexo F. Composición química y propiedades mecánicas para el acero AISI 1045. ...	136
Anexo G. Composición química y propiedades del acero AISI 1020.	136
Anexo H. Composición química y propiedades mecánicas para el acero ASTM A36..	137
Anexo I. Composición química y propiedades mecánicas del acero inoxidable 304	137
Anexo J. Composición química y propiedades mecánicas para el acero AISI 1518.	137
Anexo K. Composición química y propiedades mecánicas para el acero AIS 1035.	138
Anexo L. Datos de variables para determinar el tiempo mínimo de enfriamiento de algunos materiales poliméricos.	139

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros generales de la máquina inyectora de plásticos.	27
Tabla 2. Nuevos elementos del equipo de inyección vertical de polipropileno.....	30
Tabla 3. Características de la mesa de soporte.....	34
Tabla 4. Características del perno.	36
Tabla 5. Características de la viga tipo cajón.....	37
Tabla 6. Relación de radios para cilindro de plastificación.	41
Tabla 7. Defectos de piezas poliméricas inyectadas.	62
Tabla 8. Resultados de la simulación realizada de la viga cajón	71
Tabla 9. Selección del material para las columnas	72
Tabla 10. Selección del material de la boquilla de inyección	73
Tabla 11. Selección del material para las placas superior e inferior.	73
Tabla 12. Selección del material para el torpedo de inyección.....	74
Tabla 13. Interpolación de la relación de radios para el cilindro de plastificación.....	75
Tabla 14. Esfuerzo último y Esfuerzo de fluencia de los materiales preseleccionados...77	
Tabla 15. Factores de seguridad entregados por cada uno de los aceros evaluados.	78
Tabla 16. Criterios para la selección del material del cilindro de plastificación.	78
Tabla 17. Matriz para selección del material del cilindro de plastificación.....	79
Tabla 18. Tamaño de filete de la soldadura (garganta).	87
Tabla 19. Resultados obtenidos en la simulación del torpedo de inyección.....	92
Tabla 20. Procesos involucrados en la construcción del molde de inyección.	104
Tabla 21. Resultados obtenidos de inyección sin molde.....	109
Tabla 22. Resultados de la validación con molde de inyección.....	112

Tabla 23. Parte interna de las piezas inyectadas.	114
Tabla 24. Comparación de dimensiones del molde y de la pieza.	115
Tabla 25. Procedimiento para encender el banco hidráulico.	126
Tabla 26. Procedimiento para apagado del banco hidráulico.	128

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de una máquina inyectora de plásticos.....	22
Figura 2. a) Equipo de embutido y troquelado vertical para láminas metálicas b) Equipo adaptado para inyección de materiales termoplásticos.	29
Figura 3. a) Vista frontal de la máquina inyectora y elementos nuevos. b) Vista isométrica de los nuevos elementos.	30
Figura 4. Ubicación de fuerza y geometrías fijas, simulación viga tipo cajón.	37
Figura 5. Malla establecida para simulación de la viga cajón.....	38
Figura 6. Partes del cilindro de plastificación.	40
Figura 7. Correspondencia de radios en un cilindro de plastificación.	41
Figura 8. Esquema de la boquilla de inyección.....	46
Figura 9. Diagrama de cuerpo libre de las columnas principales considerando pesos. ...	48
Figura 10. Diagrama de cuerpo libre de las columnas principales.	48
Figura 11. Diagrama de cuerpo libre de las columnas secundarias.	51
Figura 12. Procedimiento sugerido para determinar la rigidez del sujetador.	57
Figura 13. Esquema del torpedo de inyección.	58
Figura 14. a) material con mayor viscosidad en la parte superior. b) material con mayor viscosidad desplazado hasta el cono del cilindro.	59
Figura 15. Cilindro hidráulico doble efecto validado	64
Figura 16. Diagrama de cuerpo libre para la mesa de soporte considerando el peso de los elementos.....	66
Figura 17. Diagrama de cortante para la mesa de soporte considerando el peso de los elementos.....	66

Figura 18. Diagrama de momento flector para la mesa de soporte considerando el peso de los elementos.	66
Figura 19. Diagrama de cuerpo libre de la mesa de soporte.	67
Figura 20. Diagrama de fuerza cortante para la mesa de soporte.	67
Figura 21. Diagrama de momento flector para la mesa de soporte.	68
Figura 22. Perno validado la máquina inyectora de polipropileno de tipo vertical.	69
Figura 23. Esfuerzo de Von Mises - simulación de la viga cajón.	70
Figura 24. Desplazamientos - simulación de la viga cajón.	70
Figura 25. Factor de seguridad - simulación de la viga cajón.	71
Figura 26. Resistencias eléctricas tipo banda seleccionadas.	87
Figura 27. Esfuerzo de Von Mises - simulación torpedo de inyección.	91
Figura 28. Desplazamientos - simulación del torpedo de inyección.	91
Figura 29. Factor de seguridad - simulación del torpedo de inyección.	92
Figura 30. a) Cambio de posición del equipo b) Extracción de pernos c) Acople de las columnas principales a sus limitantes superior e inferior d) Unión final de los pernos a la viga cajón.	95
Figura 31. Placas superior e inferior con sus bujes soldados.	97
Figura 32. Soldadura de columnas secundarias en los bujes.	97
Figura 33. Estructura secundaria.	98
Figura 34. Cilindro de plastificación acoplado.	101
Figura 35. Proceso de soldadura para fijación del cilindro de plastificación a la placa superior.	102
Figura 36. Unión de la boquilla de inyección al cilindro de plastificación.	102
Figura 37. Ubicación y ajuste del torpedo en el acople.	103

Figura 38. Máquina de inyección para polipropileno parcial.	105
Figura 39. Resistencias eléctricas y termocuplas tipo j ubicadas en el cilindro de plastificación.	106
Figura 40. Interior de la caja de control	106
Figura 41. Máquina inyectora para polipropileno tipo vertical terminada.....	107
Figura 42. Polipropileno reciclado pelletizado y polipropileno reciclado triturado.	108
Figura 43. Prueba de inyección de la máquina inyectora.....	110
Figura 44. Geometría de la pieza de termoplástico a inyectar.	111
Figura 45. Piezas inyectadas con molde de inyección.	115
Figura 46. Segunda pieza obtenida en aptas condiciones	116
Figura 47. Pieza cortada a la mitad mientras se da el proceso de enfriamiento.....	116
Figura 48. Mangueras y conexiones hidráulicas.	121
Figura 49. Conexión de las mangueras del banco hidráulico al cilindro doble efecto...	121
Figura 50. Conexión eléctrica 220v de la caja de control	122
Figura 51. Ubicación de la tolva de alimentación.	123
Figura 52. Medición de la cantidad de material y adición de este en la tolva de alimentación.	123
Figura 53. Breakers para encendido de la caja de control.....	124
Figura 54. Precalentamiento del molde.....	125
Figura 55. Ubicación y apriete del molde de inyección.....	125
Figura 56. Accionamiento del avance del torpedo de inyección.	127
Figura 57. Liberación de la pieza inyectada del molde.....	128

RESUMEN

A nivel global los polímeros termoplásticos son utilizados para una gran cantidad de funciones y por ende su producción es muy solicitada en la industria. Existen varios métodos para el moldeo de plásticos, pero el más usado y difundido es el proceso de inyección por lo cual es importante que ingenieros en formación conozcan y se familiaricen con dicho proceso.

Atendiendo esa necesidad, se diseñó y construyó una máquina inyectora vertical de termoplásticos con el propósito de inyectar polipropileno con una cantidad de hasta 120 gramos y cuya finalidad es implementarse para la pedagogía e investigación en el programa de ingeniería mecánica de la universidad de Córdoba. Para el diseño de esta máquina se partió del uso del equipo de troquelado y embutido vertical de láminas metálicas perteneciente a la universidad de Córdoba, al cual se le sustrajeron partes y a añadieron componentes; se involucraron conceptos de transferencia de calor, hidráulica, materiales de ingeniería, mecánica de materiales y diseño de máquinas para complementar el diseño. A partir de la cantidad de masa máxima a inyectar se establecieron varios parámetros de la máquina y se dio el dimensionamiento de sus partes.

Para la validación, se constató que las piezas obtenidas resultaran sin porosidades en la superficie o el interior y con las dimensiones deseadas; los parámetros determinantes durante el proceso son temperatura de funcionamiento, tiempo de sostenimiento, tipo de material y precalentamiento del molde.

Palabras claves: Inyección de termoplásticos, inyección vertical, polipropileno.

ABSTRACT

Across the board, thermoplastic polymers are used for different purposes and as a result, its production is highly demanded in the market. Among the methods used for the casting of plastics, the most commonly used is the injection process which novice engineers need to know and be familiarized with.

To meet that end, it was designed and built a vertical injection machine of thermoplastic which purpose is to inject polypropylene in a quantity that can be up to 120 grams. This machine is aimed to be integrated to the pedagogy and research in the mechanic engineering program of the University of Cordoba. To design this machine, it was necessary to start from the use of vertical die-cut and packing of metal plates which belongs to the University of Cordoba. Subsequently, some parts were subtracted as well as some components were added; important concepts were involved, such as heat transfer, hydraulics, engineering materials, materials mechanic, and the design of machinery for completing the whole design. From the quantity of the maximum mass to inject, there were established different parameters to the machine and the dimensioning of all its parts.

In order to validate this project, all the parts were carefully examined to assure that any of them may have porosities inside or outside, and that each of them meet all the requirements in terms of dimensions. Crucial parameters during the process are operating temperature, time of sustained pressure, type of material and mold preheating.

Keywords: Thermoplastic Injection, vertical injection, polypropylene.

1. INTRODUCCIÓN

La industria de los polímeros, específicamente los conocidos como termoplásticos han incrementado a través de los años, en especial en las últimas décadas por la aparición de varios productos de uso diario, como computadoras, aparatos eléctricos y electrónicos, utensilios de cocina, entre otros. Desde comienzos del siglo XX cuando comenzó a surgir este material, se ha producido a nivel mundial más de 8.000 millones de toneladas de polímeros de todo tipo, desde envases de bebidas hasta fibras textiles (Jiménez, 2017). Solo en Colombia, el consumo per cápita de polímeros está estimado en 24 kilogramos al año (Valle, 2017) lo que se aprecia como una cantidad considerable, teniendo en cuenta que el uso de este material está asociado a la mayoría de actividades que una persona realiza diariamente. Sólo un 70 por ciento de este consumo lo componen cinco variedades de polímeros termoplásticos: policloruro de vinilo, polietileno de alta y baja densidad, polipropileno y poliestireno (Shackelford, 2005).

Sabiendo el nivel de globalización alcanzado con los polímeros termoplásticos, es correcto afirmar que en el campo de la industria manufacturera es imprescindible tener conocimientos sobre el proceso de conformado de estos materiales; y siendo la ingeniería mecánica una carrera que incursiona en dicha industria, es importante relacionarse con equipos de moldeo de termoplásticos, tales como: máquinas de inyección, máquinas de extrusión, máquinas de compresión, máquinas de rotomoldeo, máquinas de termoformado, entre otras. Actualmente, en el programa de ingeniería mecánica de la universidad de Córdoba no se encuentra ninguno de los equipos relacionados anteriormente, por tal motivo, la creación de un equipo que satisfaga una de estas necesidades es de gran ayuda para el saber hacer de los estudiantes del pregrado.

El equipo de inyección de termoplásticos es el más difundido a nivel mundial, y en diversas universidades se han realizado prototipos de estas máquinas, las cuales han tenido resultados satisfactorios, en donde los estudiantes han tenido la oportunidad de involucrar los conocimientos adquiridos de diversas asignaturas junto a la parte práctica. Tal es el caso de Yamil Perchy y Edgar Donney's que en 1980 quienes diseñaron y construyeron una máquina inyectora con una capacidad de inyección de 80 gramos en material polipropileno en la universidad industrial del Santander en Colombia; o el caso de Alicia Enríquez y Guillermo Lincango que en 2015 diseñaron y construyeron una máquina de inyección de termoplásticos destinado a fines académicos para el laboratorio de procesos de manufactura del DECEM, su capacidad de fabricación abarcaba hasta los 15 gramos de peso en la universidad de las fuerzas armadas en Sangolquí – Ecuador.

Teniendo en cuenta lo anterior, se implementó una máquina inyectora de plásticos tipo vertical para polipropileno con capacidad de inyección para piezas de hasta 120 gramos, donde primero se seleccionaron los parámetros de diseño, luego se utilizó herramientas de diseño asistido por computador y criterios de diseño de máquinas y finalmente se realizó la validación, con lo que finalmente se obtuvo un equipo funcional y seguro.

2. OBJETIVOS

2.1.OBJETIVO GENERAL

Implementar una máquina inyectora de plásticos tipo vertical para polipropileno con capacidad de inyección para piezas de hasta 120 gramos, a partir de del equipo de troquelado y embutido de láminas metálicas presente en el laboratorio de materiales y procesos.

2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Seleccionar los parámetros de diseño de la máquina de inyección vertical teniendo en cuenta literatura relacionada y el parámetro de los 120 g.
2. Diseñar los componentes de la máquina de inyección utilizando herramientas de diseño asistido por computador y criterios de diseño de máquinas.
3. Construir y validar la máquina inyectora de polipropileno mediante la inyección de piezas plásticas, con el fin de obtener un resultado visualmente medible.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1.MARCO TEORÍCO

3.1.1. *Polímeros*

Los polímeros son materiales formados por macromoléculas que se unen de forma lineal o ramificada, formados por la repetición indefinida de grupos funcionales simples (monómeros) que se componen básicamente de C, H, O, N (Shackelford, 2005). En estos materiales se forman mediante la unión de enlaces covalentes y enlaces secundarios, existen dos formas de obtener polímeros, es decir, obtener cadenas largas a partir de la unión de los meros, estas son: Polimerización por adición y Polimerización por condensación.

3.1.1.1. *Propiedades térmicas de los polímeros*

- a) *Temperatura de transición vítrea (T_g):* Se define como la temperatura o intervalo donde el material sólido pasa de un estado sólido a líquido viscoso. Es la temperatura en la que se inicia una caída del módulo elástico, cambiando el material de rígido a flexible, con comportamiento visco plástico.
- b) *Temperatura de fusión (T_m):* Este se define como la temperatura a la cual un sólido pasa a líquido a la presión atmosférica. (Típicamente, $T_m = 1.5 - 2$ veces T_g , expresadas ambas en K).
- c) *Temperatura de descomposición (T_d):* Temperatura a la cual pueden romperse los enlaces covalentes del polímero, y por ende puede quemarse o carbonizarse.

3.1.1.2. *Clasificación de los polímeros*

Generalmente los polímeros se clasifican de acuerdo con su comportamiento al calor en:

- a) *Termoplásticos*: Son materiales cuyas macromoléculas están ordenadas a manera de largas cadenas unidas entre sí por medio de enlaces secundarios, su ordenación se puede comparar con una madeja de hilos largos y delgados. Su principal característica de estos es que pueden ser llevados a un estado viscoso una y otra vez por medio del calentamiento y ser procesados varias veces.
- b) *Termofijos*: Son materiales que no se reblandezcan con la aplicación de calor cuando ya han sido transformados. A diferencia de los termoplásticos, estos materiales ya no pueden moldearse porque al aplicarles calor se desintegran.
- c) *Elastómeros*: Son materiales que tienen memoria, es decir, que al someterlos a un esfuerzo modifican su forma, recuperándola cuando se retira ese esfuerzo. Adicionalmente están los *elastómeros termoplásticos* que forman un grupo especial de polímeros; con la facilidad de procesamiento de los termoplásticos y el comportamiento elástico de los elastómeros.

3.1.2. *Procesamiento de los polímeros*

En los termoplásticos, el moldeo por inyección y el moldeo por extrusión son los procesos predominantes. Adicionalmente, se tiene el moldeo por soplado el cual es el proceso complementario usado para proporcionar la forma deseada a las piezas moldeadas y es usado principalmente para producir recipientes poliméricos. Por otra parte, el moldeo por compresión y el moldeo por transferencia son los procesos predominantes para los elastómeros y polímeros termoestables, respectivamente (Shackelford, 2005).

También se encuentran los siguientes procesos para el conformado de polímeros: Calandrado, hilado, termoformado, colado, moldeo de inyección por reacción (MIR).

3.1.3. Moldeo por inyección

En la Figura 1 se muestra un esquema de una máquina convencional utilizada para la inyección de plásticos. Las partes principales que conforman cualquier máquina de este tipo son: Unidad de control, unidad de potencia, unidad de fundición, unidad de cierre y la unidad de inyección.

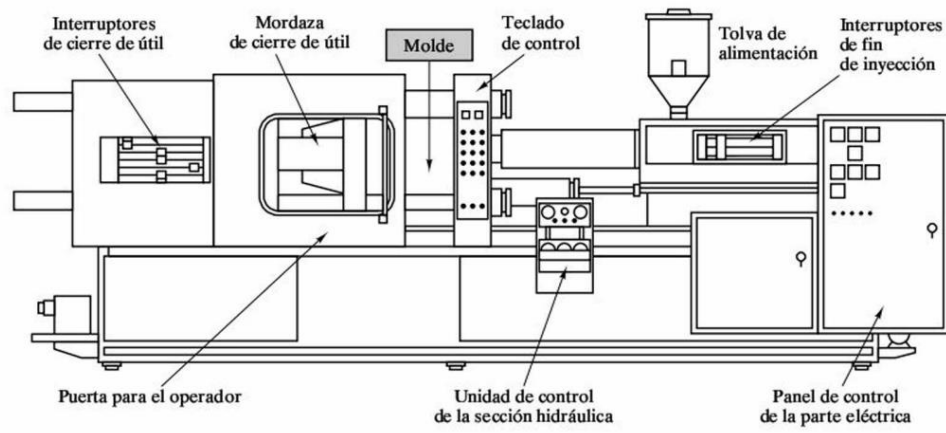


Figura 1. Esquema de una máquina inyectora de plásticos

Fuente: (Shackelford, 2005).

El proceso básico de moldeo por inyección de plásticos comprende las tres operaciones básicas que a continuación se mencionan:

1. Elevar la temperatura del termoplástico en forma de pellets a un punto donde pueda fluir bajo la aplicación de presión.
2. Permitir la solidificación del material en el molde cerrado. En esta etapa el material fundido ya plastificado en el barril de la máquina se inyecta a través de

una boquilla, que conecta el barril hacia los canales del molde hasta llegar a las cavidades donde toma la forma del producto final.

3. Apertura del molde para la extracción de la pieza. Esto se hace después de mantener el material bajo presión dentro del molde y una vez que el calor se reduce para permitir solidificar el material en la forma deseada. (Sánchez, 2005).

3.1.4. Factores que influyen en el proceso de moldeo por inyección

3.1.4.1. Temperatura

En los materiales termoplásticos, la viscosidad es constante cuando la temperatura es constante, por consiguiente, las variaciones de temperatura de un material termoplástico se traducen en variaciones de viscosidad.

Para llevar el control de la temperatura durante el moldeo de inyección en el cilindro de plastificación, se recomienda la inserción de una serie de termopares en las diferentes zonas del recorrido del material desde la tolva hasta la boquilla, los termopares están conectados a sistemas de control que mantienen la temperatura en un rango ya determinado por el operador.

3.1.4.2. Viscosidad del material

Es una característica intrínseca del material plástico y simboliza la “dificultad o facilidad” con la que el material fluye dentro de un determinado conducto. Puesto que los materiales poliméricos no son newtonianos, su viscosidad no es constante y depende de dos parámetros: La temperatura a la que se encuentra el material y el gradiente de velocidad al que se somete el material al fluir dentro de la cavidad.

3.1.4.3. Presión

La presión requerida para vencer la resistencia que el material fundido produce a lo largo de su trayectoria, la resistencia es originada por:

- ✓ La brusca reducción de sección en la boquilla, los canales de alimentación y las entradas al molde.
- ✓ La longitud de la trayectoria y la geometría más o menos complicada de la cavidad que debe producir la pieza moldeada.
- ✓ El material que progresivamente se endurece a lo largo de su trayectoria (Bondini & Cacchi, 1994).

3.2. ESTADO DEL ARTE

- En 1980, en la Universidad Autónoma Yamil Perchy y Edgar Donney's de la facultad de ingeniería mecánica diseñaron y construyeron una máquina inyectora con una capacidad de inyección de 80 gramos en polipropileno, mediante el sistema pistón (torpedo) y su disposición de inyección fue de forma horizontal. Una máquina inyectora funcional destinada a la creación de productos plásticos pequeños, involucrando costos de construcción bajos, que dieron como resultado un dispositivo de alta calidad destinado al uso comercial de pequeñas empresas. (Perchy & Donney's, 1980).
- En el año de 2002, en la ciudad universitaria de El Salvador, diseñaron y construyeron un equipo de conformado de plásticos para fines didácticos con una capacidad de inyección de 40 gramos, cuyo funcionamiento debía ser asistido y no era operado auto o semiautomáticamente. Dentro de las configuraciones

principales de esta máquina se destacó la disposición de inyección horizontal y presión máxima de inyección de 275 bares. La pieza moldeada fue una probeta para ensayos de tracción de materiales termoplásticos norma ISO 294-2:1996 (barras pequeñas para tracción), con material de inyección polietileno. (Martínez, Molina & Rivera, 2002).

- En 2015, Alicia Enríquez y Guillermo Lincango de la universidad de las fuerzas armadas en Sangolquí – Ecuador, diseñaron y construyeron una máquina de inyección de termoplásticos destinado a fines académicos para el laboratorio de procesos de manufactura del DECEM, su capacidad de fabricación abarcaba hasta los 15 gramos de masa, su material de trabajo base fue el polietileno, su disposición de inyección fue vertical y su sistema de inyección obedeció a pistón-embolo. En la validación de esta máquina y puesta en marcha, concluyeron que los principales parámetros que influyen en la calidad de las piezas son: el tiempo de inyección, la temperatura de la resistencia eléctrica y la presión del compresor, ya que variando estos parámetros se pueden ocasionar varios problemas en las piezas finales cómo lo son: fundición incompleta, rebabas, llenado incompleto y burbujas (Enríquez & Lincango, 2015).

Por otro lado, dentro de lo establecido en este trabajo de investigación los autores establecieron que entre las ventajas de usar la disposición de inyección vertical está lo siguiente: la configuración es más sencilla ya que no requiere mucho espacio para su funcionamiento, no se requiere el uso de husillo, el molde no necesita ningún tipo de agarre para sostener la boquilla puesto que esta se sostiene en el molde por gravedad y por la misma gravedad se hace un llenado del molde más efectivo.

- Los ingenieros Emerson Román y Luis Patrón en 2017, diseñaron y construyeron el equipo para troquelado y embutido vertical para el laboratorio de procesos de la Universidad de Córdoba. En esta máquina se usaron elementos hidráulicos para la fuente de potencia, con un diseño que involucró una viga tipo cajón, columnas, matrices de embutido y troquelado, una estructura de soporte y un cilindro hidráulico doble efecto. Los diseñadores obtuvieron una máquina completamente funcional, modular y por supuesto segura. (Emerson & Patrón, 2017).

4. METODOLOGÍA

4.1. CARACTERÍSTICAS Y PARÁMETROS

En la Tabla 1 se muestran los parámetros y las características definidos para la máquina de inyección de polipropileno de tipo vertical.

Tabla 1. Parámetros generales de la máquina inyectora de plásticos.

PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN	CRITERIO DE SELECCIÓN
Presión de inyección máxima teórica	2,5 ton/in ² (38,6 MPa)	Recomendación de la literatura
Cantidad de masa inyectada máxima	120 gramos	Diseñadores
Diámetro del torpedo de inyección	38,1 mm	Diseñadores, diámetro comercial y cantidad de material a inyectar
Volumen de inyección calculado	146000 mm ³	Cantidad máxima de material a inyectar
Sistema de inyección	Torpedo- hidráulica	Diseñadores, recomendación de la literatura
Fuente de potencia	Bomba hidráulica	Diseñadores, disponibilidad del equipo.
Tipo de alimentación	Manual	Recomendación de la literatura
Disposición de inyección	Vertical	Recomendación de la literatura, llenado efectivo del molde
Unidad de fundición	Resistencias eléctricas tipo banda	Recomendación de la literatura, sugerencia de expertos
Dispositivo de control de temperatura	Controlador de temperatura PID	Diseñadores, recomendación de la literatura
Dispositivo de medición de temperatura	Termocupla tipo J	Diseñadores, sugerencia de expertos
Dimensiones generales de la máquina	2294 mm x 516 mm x 791 mm	Medidas del equipo de troquelado, cantidad máxima de material a inyectar
Dimensiones máximas para el molde de inyección	95 mm x 70 mm x 80 mm	Diseñadores, máxima cantidad de material a inyectar

Fuente: Autores, 2019.

En términos generales, esta máquina se encuentra constituida por:

1. Un sistema de alimentación manual tipo tolva por donde se admite y transporta el material granulado termoplástico.
2. Una cámara de calefacción que calienta de forma uniforme el material termoplástico.
3. Un sistema hidráulico que impulsa el vástago a través de la cámara de calefacción.
4. Un sistema de control con el que se monitorea temperatura y se controla el avance y retroceso del vástago.

4.2.DISEÑO ESQUEMATICO

Para el diseño esquemático de la máquina inyectora de polipropileno se tomó como base el equipo de troquelado y embutido para láminas metálicas (figura 2a), el cual es perteneciente al laboratorio de materiales y procesos de la Universidad de Córdoba. Este equipo se adaptó para la construcción de la máquina inyectora, aprovechando la forma modular con la que esta fue diseñada y dándole un uso adicional sin alterar su funcionalidad. Con la ayuda del software de diseño asistido por computador Solidworks® 2015, se realizó un diseño esquematizado para la máquina inyectora de polipropileno (ver figura 2b).

De las partes pertenecientes el equipo de embutido y troquelado, solo se realizó modificación a las columnas de soporte, aumentando la longitud de estas para aprovechar la carrera del cilindro hidráulico en el proceso de inyección. Asimismo, el cilindro hidráulico doble efecto, la viga tipo cajón, estructura de la mesa, mesa y tuberías

se les realizaron sus respectivos cálculos para validar su funcionamiento en el equipo de inyección de polipropileno.

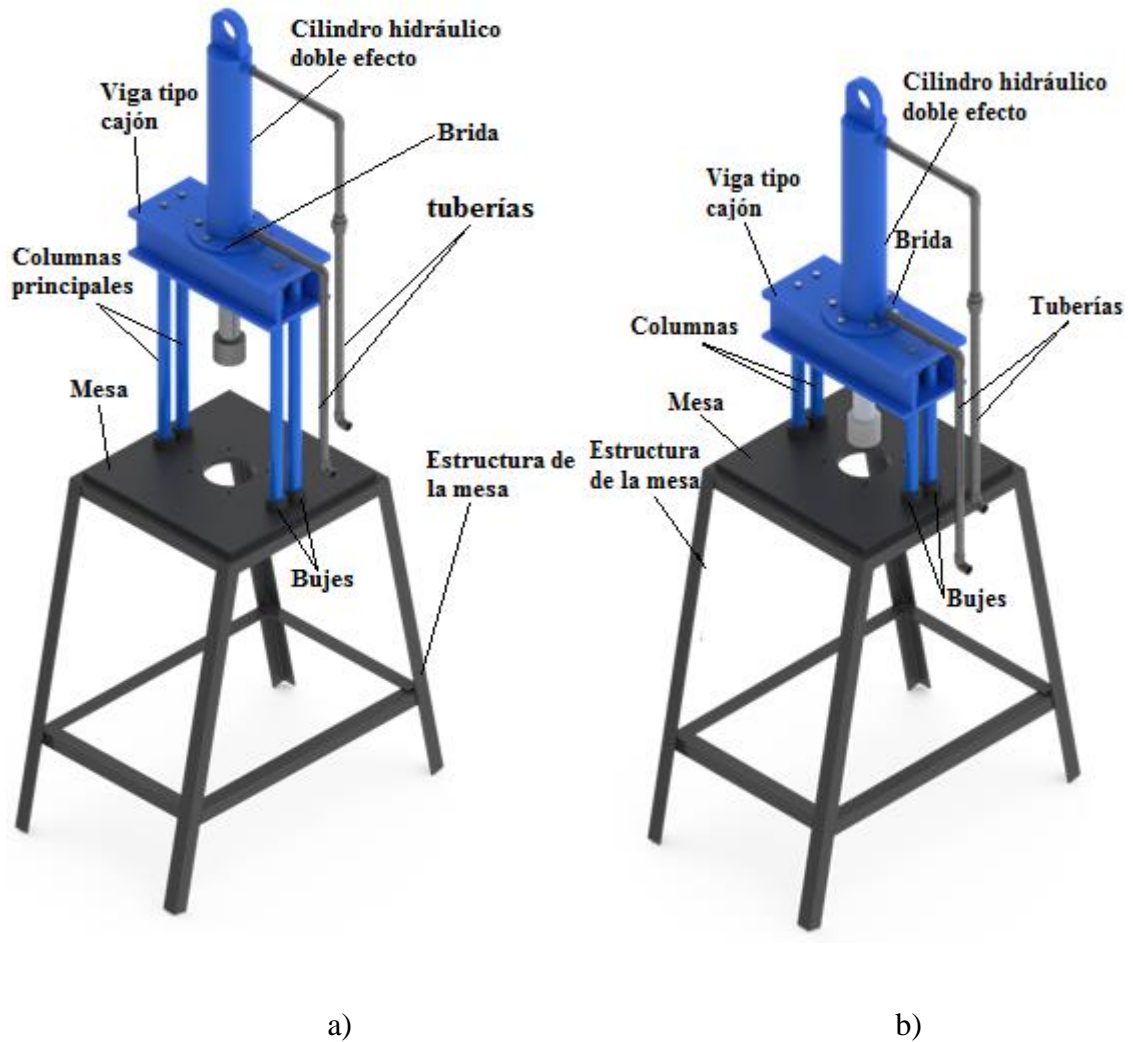


Figura 2. a) Equipo de embutido y troquelado vertical para láminas metálicas **b)** Equipo adaptado para inyección de materiales termoplásticos.

Fuente: Autores, 2019.

4.2.1. Diseño esquemático de los nuevos elementos

En las figuras 3a y 3b se pueden observar los elementos con los que se complementó la máquina inyectora de polipropileno de tipo vertical.

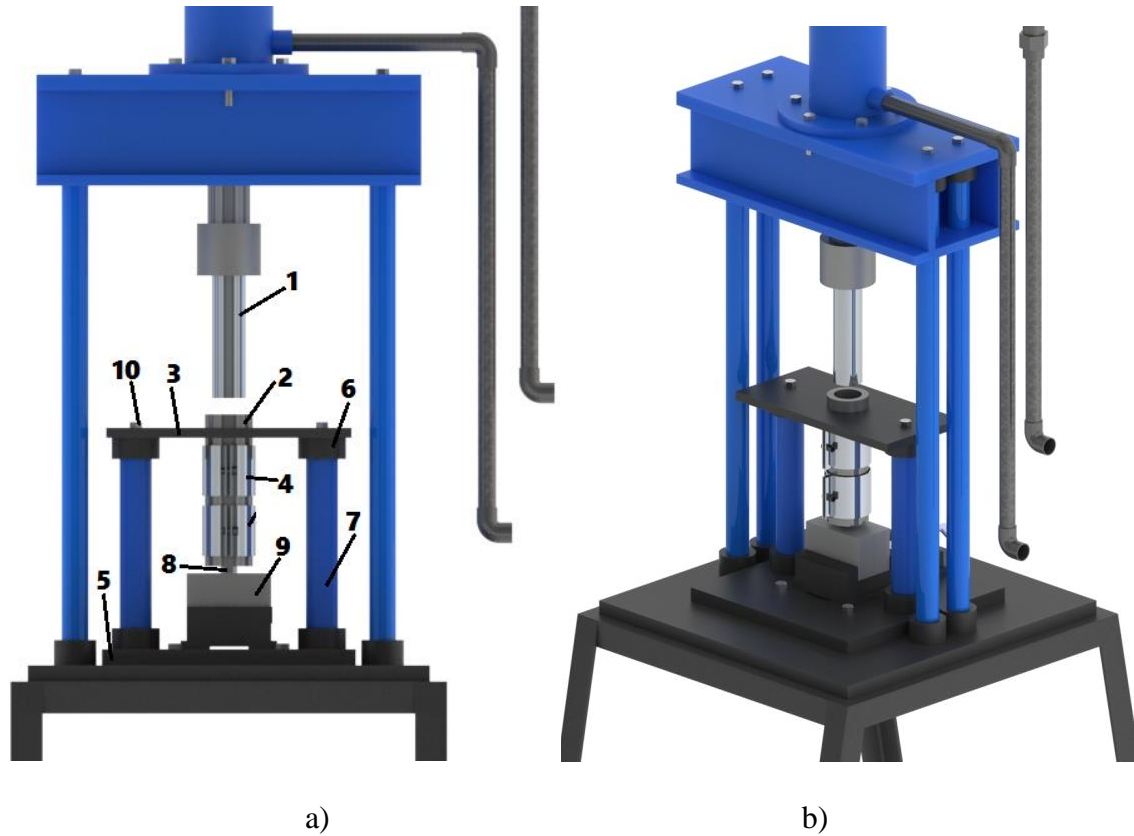


Figura 3. a) Vista frontal de la máquina inyectora y elementos nuevos. b) Vista isométrica de los nuevos elementos.

En la tabla 2 se muestran las partes enumeradas en la figura 3a.

Tabla 2. Nuevos elementos del equipo de inyección vertical de polipropileno

Nº	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Torpedo de inyección	1
2	Cilindro de plastificación	1
3	Placa superior	1
4	Resistencia eléctrica tipo banda	2
5	Placa inferior	1

6	Buje secundario	4
7	Columna secundaria	2
8	Boquilla de inyección	1
9	Molde de inyección	1
10	Perno de sujeción	6

Fuente: Autores, 2019.

A estos nuevos elementos, se les realizó sus respectivos análisis y cálculos con los cuales se validaron dimensiones; además, se realizó el proceso de selección del tipo de material para cada uno de ellos.

En el diseño esquemático planteado no se muestran los siguientes elementos no mecánicos: Dispositivos de control de temperatura, dispositivos de medición de temperatura y elementos de conexión eléctrica; con los cuales se da calor y se monitorea la temperatura al cilindro de plastificación.

4.3.DISEÑO DE LA MÁQUINA DE INYECCIÓN VERTICAL PARA POLIPROPILENO

El diseño del equipo se llevó a cabo al aplicar conceptos sobre resistencia de materiales, estática, diseño de máquinas, transferencia de calor, hidráulica, materiales de ingeniería, instrumentación y control de procesos, diseño asistido por computador y procesos de manufactura.

El procedimiento de diseño se dividió en dos partes:

- a. *Validación de los elementos antiguos:* En esta parte del diseño, se tomaron los elementos no modificables pertenecientes al equipo de troquelado y embutido vertical, y se le realizó una validación a fin de determinar si

soportan las cargas y condiciones dispuestas para el funcionamiento de la máquina inyectora.

- b. *Diseño de los nuevos elementos:* En esta parte del diseño se realizó el análisis y cálculo correspondiente a los nuevos elementos que se implementarán en el equipo de troquelado para complementar en su totalidad la máquina inyectora de polipropileno.

4.3.1. Validación de los elementos antiguos

4.3.1.1. Validación del cilindro hidráulico doble efecto

Se realizó un análisis y cálculo para determinar si el diámetro interno del actual cilindro hidráulico doble efecto del equipo de troquelado y embutido vertical, posee un valor igual o mayor al requerido para el proceso de inyección. Si se cumple una de las dos condiciones planteadas, se establece entonces que el elemento cumple con la función deseada. El cálculo que se realizó para esta validación se muestra a continuación:

Inicialmente se utilizó la ecuación 1.

$$P = \frac{F}{A} \quad (1)$$

De dónde:

P= Presión de inyección entregada por la bomba

F= Fuerza de inyección al interior del cilindro de plastificación

A= Área de sección transversal del cilindro hidráulico.

El cilindro hidráulico doble efecto posee una sección transversal conocida (círculo), y el área del círculo es el siguiente:

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (2)$$

Dónde,

A= Área de sección transversal de un círculo.

D= Diámetro de un círculo

Ahora bien, se reemplazó la ecuación 1 en la ecuación 2 y se despejó el diámetro obteniendo como resultado la ecuación 3.

$$D = \sqrt{\frac{4 * F}{\pi * P}} \quad (3)$$

Adicionalmente, la fuerza de inyección en el cilindro de plastificación se determinó utilizando la ecuación 4.

$$F = (A1) * (P1) \quad (4)$$

De dónde,

A1= Área de sección transversal del cilindro de plastificación.

P1= Presión teórica máxima de inyección.

La presión teórica máxima de inyección corresponde a 2,5 ton/in² equivalente a 38,6 MPa, valor seleccionado por los diseñadores atendiendo a recomendaciones de la literatura y a la tabla consignada en el ANEXO A.

El diámetro interno del cilindro hidráulico doble efecto del equipo de troquelado es de 88,5 mm, se comparará este valor con el valor a calcular usando la presión seleccionada por los diseñadores para la inyección; si el segundo valor resulta menor o igual al

primero entonces el elemento se validará puesto que cumple con los requerimientos deseados.

4.3.1.2. Validación del diseño de la mesa de soporte

Las características de la mesa de soporte diseñada para el equipo de troquelado y embutido se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Características de la mesa de soporte.

MESA DE SOPORTE	
Material	Lámina de ASTM A36
Largo	475 mm
Ancho	475 mm
Espesor	19,05 mm

Fuente: Autores, 2019

Para la validación de este elemento, se realizó el análisis de flexión teniendo en cuenta que la mesa está empotrada. Ahora bien, inicialmente se hizo un análisis estático dónde se determinaron los apoyos y las fuerzas aplicadas sobre la mesa; a partir de dicho análisis mediante el uso del software Md Solids® (Licencia estudiantil) se realizó el diagrama de cuerpo libre, el diagrama de cortante y diagrama de momento flector para la mesa, y con los resultados arrojados por el último diagrama se obtuvo el valor del momento máximo actuante sobre la mesa.

Entonces, a partir de la ecuación 5 es posible obtener el espesor de la mesa.

$$\sigma = \frac{M * c}{I_x} \quad (5)$$

De dónde,

σ = Esfuerzo máximo del material

M= Momento flector máximo

c= Distancia hasta el borde externo desde el centroide, para este caso (h/2)

I_x =Momento de inercia con respecto al eje x.

El momento de inercia para este elemento se halló a través de la ecuación 6.

$$I_x = \frac{1}{12}(b)(h^3) \quad (6)$$

De dónde,

b= Base de la figura de sección transversal de la viga.

h= Altura de la viga.

Entonces, despejando I_x de la ecuación 5 se obtuvo la ecuación 7.

$$I_x = \frac{M * c}{\sigma} \quad (7)$$

Se igualó la expresión (6) y (7), y despejando h se obtuvo finalmente el mínimo espesor de la viga (ecuación 8).

$$h = \sqrt{\frac{6 * M}{\sigma * b}} \quad (8)$$

Adicionalmente, se validó la mesa de soporte actual la cual posee un espesor de 19,05 mm utilizando el momento máximo presente en la mesa, el cual es dado por el diagrama de momento flector, y a partir del resultado de factor de seguridad que se calculó se validará la mesa.

4.3.1.3. Validación de pernos

Las características del perno seleccionado para el equipo de troquelado y embutido vertical de láminas metálicas se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Características del perno.

PERNO DEL EQUIPO DE TROQUELADO	
Material	AISI/SAE 1035
Rosca	3/8" UNC – ordinaria (9,525 mm)
Grado	5
Longitud total	50,8 mm
Longitud roscada	25,4 mm

Fuente: Autores, 2019.

Se realizó la validación de estos pernos al hallar el factor de seguridad, relacionando el esfuerzo máximo del elemento al estar sometido a la carga máxima y el esfuerzo de fluencia del material del perno antes descrito; si el valor del segundo es mayor al primero, entonces se dirá que los pernos se validaron. El factor de seguridad se halló con la ecuación que sigue:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{Sy}{n}$$

De donde,

σ = Esfuerzo máximo soportado.

F= Fuerza máxima actuante en el perno.

A= Área de sección transversal del perno.

Sy= Esfuerzo de fluencia del material del perno.

n= Factor de seguridad.

Este cálculo se realizó para el perno que se encuentra en la condición de esfuerzo más crítica, es decir, al perno que sostiene las columnas principales con la mesa de soportes.

Al haber cuatro de estos pernos completamente iguales, se realizó el cálculo para uno solo de ellos. La fuerza máxima que actúa en cada perno es equivalente a 15,37 kN.

4.3.1.4. Validación de la viga tipo cajón

Las características de este elemento se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Características de la viga tipo cajón

VIGA TIPO CAJÓN	
Material	ASTM A36
Ancho	455 mm
Alto	131,75 mm
Largo	200 mm
No de partes	4
Método de unión	Soldadura

Fuente: Autores, 2019.

Para la validación de la viga cajón, se realizó un análisis estático de elementos finitos mediante el software de diseño mecánico Solidworks® 2015. Para la simulación se tomó la estructura como una unión rígida, se creó una línea de partición circular en la parte superior de la viga con el fin de agregar la fuerza máxima de 61,51 kN producida en el momento de la inyección; además se tomaron las 4 zonas de contacto de las caras planas de las columnas principales con la viga cajón como geometrías fijas, véase figura 4.

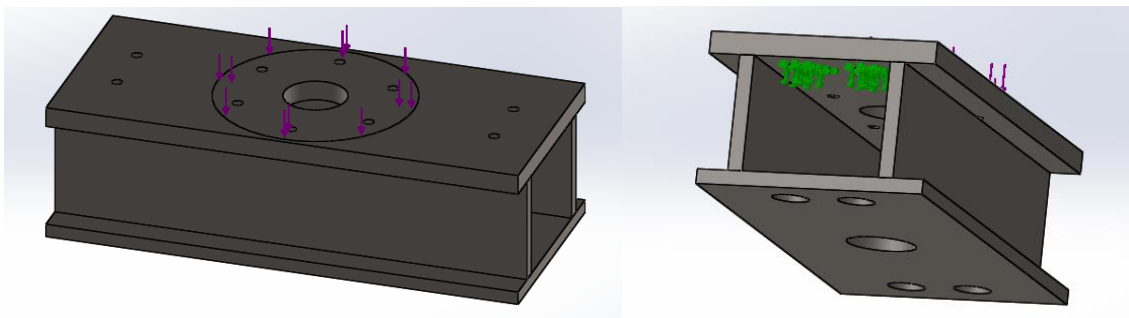


Figura 4. Ubicación de fuerza y geometrías fijas, simulación viga tipo cajón.

Fuente: Autores, 2019. Imagen tomada de Solidworks® 2015

En este sentido, se estableció una malla sólida basada en curvatura de combinado con 4 puntos jacobianos, con un tamaño de elemento mínimo de 3,0546 mm con un total de 13338 elementos y 24708 nodos para completar las condiciones de la simulación, véase figura 5.

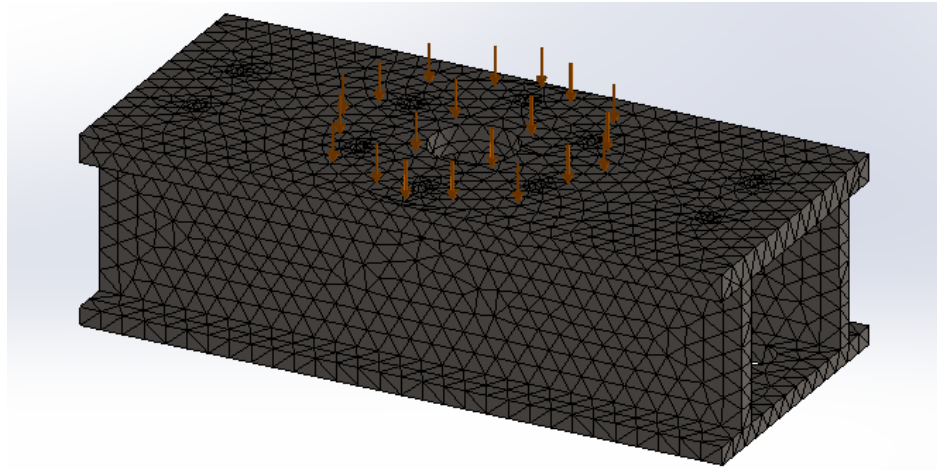


Figura 5. Malla establecida para simulación de la viga cajón.

Fuente: Autores, 2019. Imagen tomada de Solidworks® 2015.

Con los resultados arrojados por el software en cuanto a esfuerzo de Von Mises, factor de seguridad y desplazamientos, se pudo realizar la verificación de la aptitud del elemento para el equipo de inyección.

Con el valor máximo de esfuerzo de Von Mises arrojado en la simulación se realizó una comparación con el límite elástico del material de la viga y al ser el primero igual o menor al segundo se valida correctamente el elemento; Adicionalmente, se consideró válido un factor de seguridad mínimo de 2 en todo el elemento y a su vez desplazamientos no mayores a 0,09 mm en la totalidad de la viga.

4.3.2. *Diseño de los nuevos elementos*

4.3.2.1. *Selección de los materiales*

En primera instancia, para estos nuevos elementos se realizó un proceso de selección de materiales, para ello se utilizó el método tradicional y se usó una matriz de decisión desarrollada por los diseñadores para lograr el cometido.

Se utilizó un listado de propiedades y/o criterios deseados para cada elemento en este proceso de selección; estos criterios fueron designados por los diseñadores dependiendo de la condición del material, los criterios más asociados son:

- Disponibilidad comercial alta del material en Montería.
- Esfuerzo de fluencia con valor medio/alto.
- Presentación comercial en la forma deseada del material.
- Bajos costos de adquisición.
- Resistencia a la corrosión atmosférica media/alta.

Lo antes descrito se aplicó en una matriz de decisión para la selección de los materiales de los siguientes elementos: placa inferior, placa superior, columnas, boquilla de inyección, torpedo de inyección y bujes secundarios.

No se realizó este procedimiento para el cilindro de plastificación, puesto que el proceso que se usó para este elemento fue distinto y se explica más adelante; y tampoco se utilizó el proceso de selección para las resistencias eléctricas tipo banda.

4.3.2.2. Diseño y dimensionamiento del cilindro de plastificación

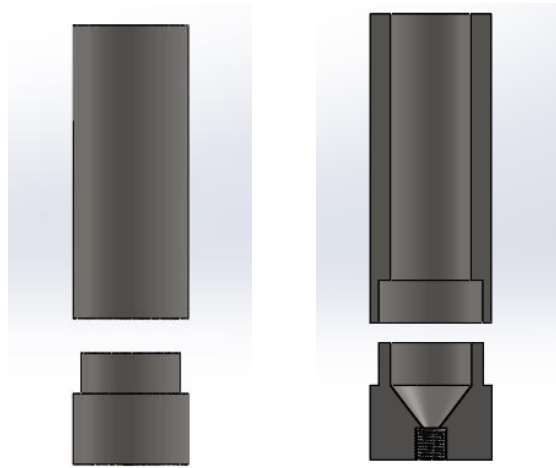


Figura 6. Partes del cilindro de plastificación.

Fuente: Autores, 2019. Imagen tomada de Solidworks® 2015.

El cilindro de plastificación, cámara de plastificación o barril de calentamiento es aquel elemento dónde se introducen los pellets de polipropileno y cambian de estado sólido a visco plástico al elevar la temperatura en el exterior del mismo. Esta pieza de la máquina constó de dos partes, la cilíndrica hueca y la parte inferior cónica interna, tal como se muestra en la figura 6. El diámetro interno del cilindro se seleccionó de acuerdo con el diámetro del torpedo seleccionado para inyección, para este caso de 38,1 mm; la longitud total del elemento se determinó a partir de la cantidad de masa máxima a inyectar y su diámetro interno, y dicha longitud correspondió a 180 mm. Ahora bien, el proceso de diseño y dimensionamiento del cilindro de plastificación se muestra a continuación:

Se determinó inicialmente el radio externo del cilindro a partir del volumen de inyección y la relación de radios del cilindro. Se calculó el volumen máximo de inyección a partir de la ecuación 9.

$$V = \frac{m_{total}}{\delta} * 1,1 \quad (9)$$

De donde,

V= Volumen máximo de inyección
 m_{total} = Cantidad de masa a inyectar en g
 δ = Densidad del polipropileno en g/cm³

De la tabla 6 se halló la relación de radios para el cilindro (figura 5), con esta relación se determinó el diámetro externo idóneo para el cilindro de plastificación, y con ello su espesor.

Tabla 6. Relación de radios para cilindro de plastificación.

Volumen máximo de inyección en cm ³	63	125	250	500	1000
Relación b:a	1,6	1,7	1,8	2	2

Fuente: Transformación de los plásticos (Waganof, 1969)

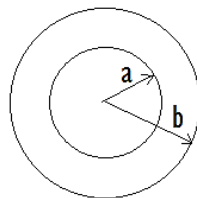


Figura 7. Correspondencia de radios en un cilindro de plastificación.

Fuente: Autores, 2019.

Una vez determinado la medida faltante, se procedió a seleccionar el material a utilizar para dicho cilindro. Se utilizó el método tradicional para seleccionar la familia de materiales, teniendo en cuenta las máquinas actuales de la industria manufacturera de plástico y los trabajos de investigación relacionados en el estado del arte se optó por utilizar un material metálico para dicho cometido. Adicionalmente, se realizó el método de matriz de pesos ponderados para seleccionar el material del cilindro de plastificación; los criterios a utilizar en esta matriz fueron seleccionados por los diseñadores y corresponden a: factor de seguridad, disponibilidad comercial, soldabilidad y corrosión/oxidación. De dónde, se aprecia que el factor de seguridad es el único criterio con carácter cualitativo que depende directamente de las condiciones de esfuerzo y las propiedades mecánicas del material, por lo que se realizó el cálculo de este valor para cada uno de los materiales considerados para el cilindro.

Para el factor de seguridad de los materiales, en primera instancia se determinaron los esfuerzos a los que es sometido el cilindro de plastificación, utilizando teoría de esfuerzos en cilindros a presión como teoría relacionada; para ello se consideró únicamente la condición de presión interna y la geometría del cilindro.

Entonces, se hallaron esfuerzos tangenciales y esfuerzos radiales de acuerdo con lo consignado en las ecuaciones 10 y 11, respectivamente.

$$\sigma_t = (Pi) \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} \right) \quad (10)$$

$$\sigma_r = Pi \quad (11)$$

De dónde

b= Radio externo.

a= Radio interno.

Pi= Presión interna en el cilindro, en este caso es la presión máxima de inyección.

Al ser esfuerzos repetitivos y que además varían desde 0 hasta su valor máximo, se determinó tanto componentes tangenciales como radiales usando las ecuaciones 12 a la 15.

$$\sigma_{tm} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (12)$$

$$\sigma_{ta} = \left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \right| \quad (13)$$

$$\sigma_{rm} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (14)$$

$$\sigma_{ra} = \left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \right| \quad (15)$$

De donde,

σ_{tm} = Esfuerzo tangencial medio

σ_{ta} = Esfuerzo tangencial alternante

$\sigma_{máx}$ = Esfuerzo máximo

$\sigma_{mín}$ = Esfuerzo mínimo.

σ_{rm} = Esfuerzo radial medio

σ_{ra} = Esfuerzo tangencial alternante

Además, se utilizó la teoría de Von Mises de tensiones biaxiales para determinar esfuerzos medio y alternante, ecuación 16 y 17 respectivamente.

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_{tm}^2 - \sigma_{tm}\sigma_{rm} + \sigma_{rm}^2} \quad (16)$$

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_{ta}^2 - \sigma_{ta}\sigma_{ra} + \sigma_{ra}^2} \quad (17)$$

De dónde,

σ'_a = Esfuerzo alternante

σ'_m = Esfuerzo medio

Adicionalmente, se complementó con teorías de fatiga dónde se involucran las propiedades mecánicas del material. Entonces, se halló el límite de fatiga, el cual se enuncia en la ecuación 18.

$$S_e = K_a \times K_b \times K_c \times K_d \times K_e \times K_f \times S'_e \quad (18)$$

De dónde,

Se= Limite de resistencia a la fatiga

Ka= Factor de modificación de la condición superficial

Kb= Factor de modificación del tamaño

Kc= Factor de modificación de la carga

Kd= Factor de modificación de la temperatura

Ke= Factor de confiabilidad

Kf= Factor de modificación de efectos varios

S'e= Limite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria

El límite de resistencia a la fatiga en viga rotatorio se determinó a partir de la ecuación

19.

$$S'_e = 0.5 S_{ut} \quad (19)$$

Dónde,

Sut: Esfuerzo último del material.

Seguidamente, se tiene la ecuación 20 con la que se halla la resistencia alternante.

$$S_a = \frac{S_e}{1 + \frac{S_e}{S_y}} \quad (20)$$

De dónde,

S_a= Resistencia alternante
S_y= Esfuerzo de fluencia del material
S_e= Limite de resistencia a la fatiga

Y así, se halló el factor de seguridad (n) mediante la ecuación 21.

$$n = \frac{S_a}{\sigma' a} \quad (21)$$

El procedimiento antes descrito se realizó para cada material considerado. Por otro lado, el valor de los demás criterios de la matriz de pesos ponderados se obtuvo a partir de búsquedas en la literatura y por el conocimiento de los diseñadores. Así que, una vez determinados los valores de cada criterio, maximizados y/o minimizados, y porcentualizados se obtuvo finalmente el material designado para la labor.

Adicionalmente, a este cilindro de plastificación se le realizó un análisis de dilatación térmica superficial para determinar el aumento o ampliación diametral que sufrirá al estar sometido a la temperatura de las resistencias eléctricas. Esto se hizo para evitar posibles atascamientos del torpedo en el cilindro de plastificación que puedan causar rayones al interior del mismo e inadecuado funcionamiento del equipo.

4.3.2.3. Cálculo del diámetro interno de la boquilla de inyección

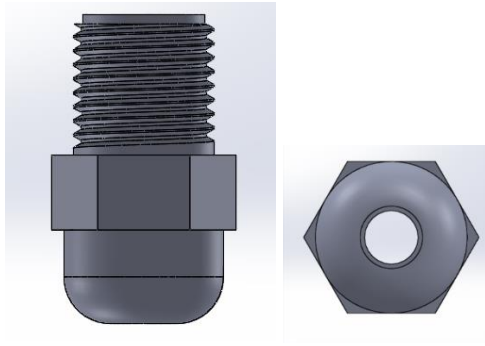


Figura 8. Esquema de la boquilla de inyección.

Fuente: Autores, 2019. Imagen tomada de Solidworks® 2015.

Para el diámetro interno de la boquilla de inyección (figura 8) se tuvo en cuenta la velocidad a la que tiene que fluir el material; puesto que si fluye muy rápido se generará un sobrecalentamiento por fricción que quemará el polímero y si por el contrario va muy lento se generarán altas presiones y pérdida de calor por ser un fluido no Newtoniano. Lo que se relaciona entre otros factores en la ecuación 22, de donde se determinó el área de abertura de la boquilla de inyección.

$$S = \frac{V}{v * t} \quad (22)$$

v = Velocidad media en m/s

V = Volumen de la pieza a inyectar en m^3

S = Área de la abertura de la boquilla en m^2

t = Tiempo en segundos

Pero S al ser igual al área de una circunferencia, se obtuvo qué:

$$\frac{V}{v * t} = \frac{\pi D^2}{4} \quad (23)$$

Siendo,

D = diámetro de abertura de la boquilla.

Finalmente, despejando la ecuación 23 se determinó el diámetro de la boquilla a partir de la ecuación 24. A partir del ANEXO B, se determinó el valor de la relación vt para polipropileno y el volumen se tomó para la máxima cantidad de material a inyectar.

$$D = \sqrt{\frac{4V}{\pi vt}} \quad (24)$$

4.3.2.4. Diseño de las columnas de soporte

a) Columnas principales

Las columnas principales son las encargadas de soportar el cilindro hidráulico doble efecto y la viga tipo cajón. Para esos elementos se tomó un diseño de 4 barras de diámetro 31,75 mm. Estas columnas poseen una altura de 680 mm, dimensión que fue escogida por los diseñadores y se determinó considerando en la longitud del cilindro de plastificación, la altura del molde, la altura de la viga tipo cajón, la altura de la prensa de sujeción, la carrera del cilindro hidráulico, la longitud del torpedo y el espacio para entrada del material polimérico. El diseño de estas se describe a continuación:

Se determinó la carga soportada por cada columna mediante un análisis estático. Al ser todas las columnas iguales, se realizó el cálculo para una sola columna y luego se extrapolaron resultados. Para hallar dicha carga se realizó el diagrama de cuerpo libre de las columnas principales considerando el peso del cilindro y el peso de la viga, el cual se muestra en la figura 9.

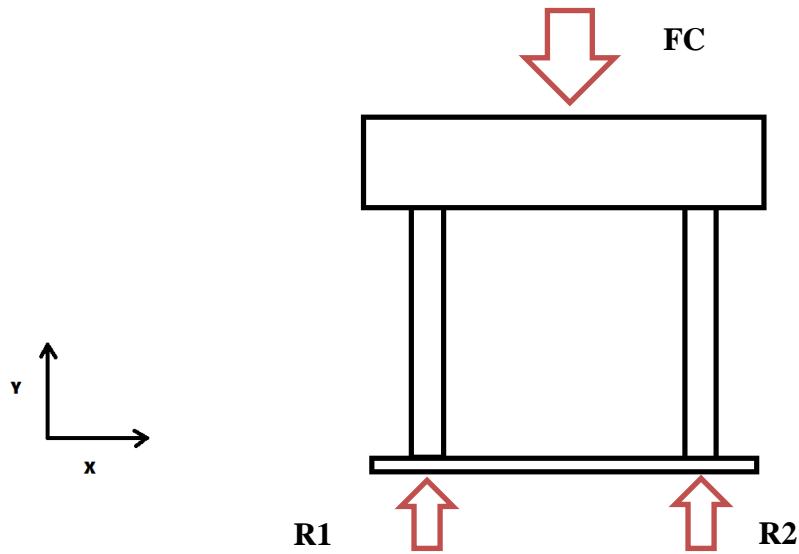


Figura 9. Diagrama de cuerpo libre de las columnas principales considerando pesos.

Fuente: Autores, 2019.

Con este diagrama y a partir de una sumatoria de fuerzas se halló el Pestático el cual equivale la fuerza aplicada en cada columna. Seguidamente, se realizó el diagrama de cuerpo libre aplicable a las columnas cuando el cilindro hidráulico está ejerciendo la fuerza de inyección, este diagrama se muestra en la figura 10.

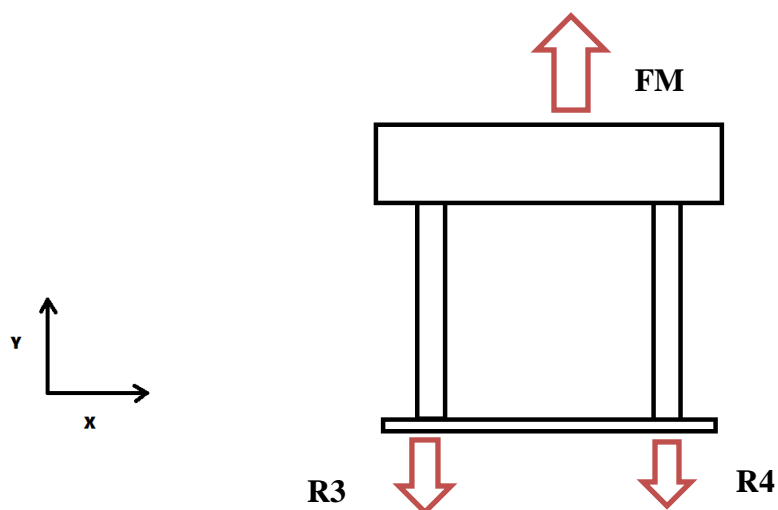


Figura 10. Diagrama de cuerpo libre de las columnas principales.

Fuente: Autores, 2019.

Con este diagrama y a partir de una sumatoria de fuerzas se halló el Pestático² que corresponde a la fuerza de cada columna considerando la fuerza de inyección. Se comparó el valor de estos dos resultados y se determinó cómo carga máxima soportada el de mayor valor.

En ese orden de ideas, se realizó un estudio de pandeo de columnas, para ello se determinó la longitud efectiva utilizando la ecuación 25, la cual se justificó mediante el ANEXO C.

$$Le = K * L \quad (25)$$

De donde,

Le= longitud efectiva

K= Factor de fijación de los extremos (0,5 para este caso, véase ANEXO C).

L= Longitud de la columna

Luego se determinó el radio mínimo de giro, correspondiente a la ecuación 26.

$$Rmin = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (26)$$

De donde,

Rmin= Radio de giro mínimo

I= Momento de inercia

A= Área de sección transversal de la columna

En este punto, se estableció la naturaleza de la columna, es decir, se determinó si la columna es larga o corta; se utilizó la relación de esbeltez dada por la ecuación 27 y la constante de columna dada por la ecuación 28. Si la relación de esbeltez es mayor a la constante de la columna es “larga”, caso contrario es “corta”.

$$SR = \frac{L_e}{R_{min}} \quad (27)$$

De donde,

SR= Relación de esbeltez

Le= longitud efectiva de la columna

Rmin= Radio de giro mínimo

Y,

$$Cc = \sqrt{\frac{2 * \pi^2 * E}{S_y}} \quad (28)$$

De donde,

Cc= Constante de columnas

Sy= Esfuerzo de fluencia del material

E= Módulo elástico del material de las columnas

La fórmula de Euler es utilizada para columnas largas (ecuación 29).

$$P_{critico} = \frac{\pi^2 * E * I}{L_e^2} \quad (29)$$

La fórmula de Johnson se utiliza para columnas cortas (ecuación 30).

$$P_{critico} = A * S_y \left[1 - \frac{S_y * \left(\frac{L_e}{r_{mín}} \right)^2}{4 * \pi^2 * E} \right] \quad (30)$$

De dónde,

Pcritico= Fuerza máxima soportada por la columna antes de sufrir pandeo

E= Módulo de Young

Le= Longitud efectiva de la columna

I= Momento de inercia

r_{min} = radio mínimo de giro
 S_y = Esfuerzo de fluencia

Una vez obtenido el valor de $P_{critico}$ a través de alguna de las dos ecuaciones antes descritas, se comparó con el valor obtenido por el Pestático2 y se obtuvo respuesta a la falla por pandeo que puede presentarse en las columnas principales.

b) *Columnas secundarias*

Estas columnas son las encargadas de soportar el cilindro de plastificación y la placa superior; para esos elementos se tomó un diseño de 2 barras de diámetro 38,1 mm. La longitud de estas columnas es de 270 mm. Esta dimensión fue seleccionada por los diseñadores y se determinó teniendo en cuenta la altura del cilindro de plastificación, la altura del molde, la altura de la prensa de sujeción y la longitud de la boquilla de inyección.

Para determinar la carga máxima aplicada en las columnas secundarias, se realizó un análisis estático. Para ello se realizó el diagrama de cuerpo libre cuando la fuerza de inyección máxima está siendo ejercida, véase figura 11.

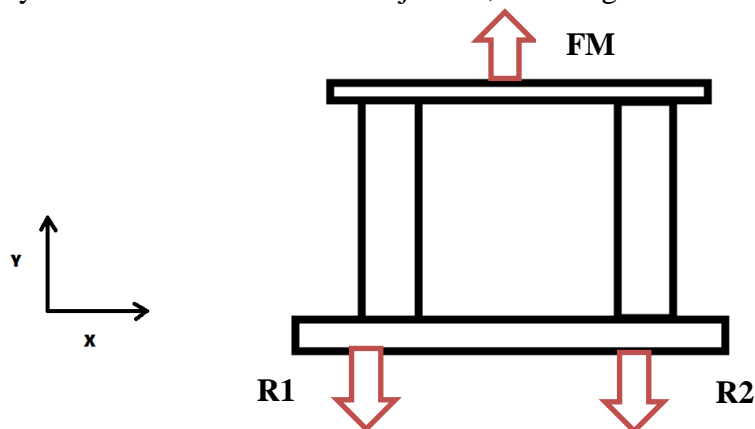


Figura 11. Diagrama de cuerpo libre de las columnas secundarias.

Fuente: Autores, 2019.

A partir de este diagrama se realizó una sumatoria de fuerzas en “y” con la cual se halló la fuerza máxima soportada por una sola columna; cabe resaltar que, al ser dos elementos iguales y equidistantes entre sí, el valor hallado para una columna será el mismo para ambas.

El procedimiento para el análisis del pandeo de estas columnas se determinó de igual manera que las columnas principales.

4.3.2.5. Cálculo de la potencia necesaria para la generación de calor a través de las bandas

La fuente de calor será proporcionada por resistencias eléctricas tipo banda; a fin de obtener zonas con distintas temperaturas en el cilindro de plastificación se optó por el uso de más de una resistencia. Las dimensiones de las resistencias están condicionadas por el diámetro exterior y la longitud del cilindro de plastificación.

Se determinó la potencia mínima que deben entregar estos accesorios para lograr cambiar el estado de los pellets de polipropileno en una cantidad de tiempo determinado, esta potencia es el Q_{neto} y está dado por la ecuación 31.

$$Q_{neto} = (Q_1 + Q_2) * 1,1 \quad (31)$$

De dónde, Q_1 es la cantidad de calor (ecuación 32) y Q_2 es la pérdida de calor por convección (ecuación 34); En consideración de pérdidas adicionales se multiplicó por un 10%, que es el 1,1 que se muestra en la ecuación antes enunciada. Ahora bien,

$$Q_1 = \dot{m} * \text{Contenido de calor} \quad (32)$$

De dónde,

Q_1 = Cantidad de calor en btu/hora
 \dot{m} = Flujo másico dado en lb/h.
 contenido de calor por libra de polipropileno dado en unidades de btu/lb.

El contenido de calor por libra de polipropileno se determinó con la gráfica presentada en el ANEXO D y el valor de temperatura de plastificación del polipropileno establecida en el ANEXO E. Posteriormente llevamos el valor de Q_1 a sistema internacional en kcal/h.

Se consideró el cilindro de plastificación como una tubería, por tanto, se utilizó la ecuación de pérdida de calor en una tubería (ecuación 33) y con ella se determinó la temperatura exterior (T_s) del cilindro, la cual se encontrará en las bandas de transferencia de calor.

$$-Q_1 = \frac{2 \times \pi \times K \times l \times (T_p - T_s)}{\ln \frac{r_0}{r_1}} \quad (33)$$

De donde,

Q_1 = Pérdida de calor en la tubería, va en sentido contrario al flujo de calor.

K = Conductividad térmica del material de la tubería en kcal/h*m*°c

l = longitud del tubo en m

T_p = temperatura interior en °C

T_s =temperatura exterior en °C

r_1 = radio interno del cilindro en m

r_0 = radio externo del cilindro en m

Luego, se halló la pérdida de calor por convección.

$$Q_2 = h_c \times A \times \Delta T \quad (34)$$

De donde,

Q_2 = Rapidez de calor transferido por convección en kcal/h

A = Área de transferencia de calor en m^2

ΔT = Diferencia de temperatura entre la temperatura de la superficie T_s y la temperatura del ambiente en $^{\circ}C$.

h_c = Coeficiente de convección del aire (5,368 kcal/ $h \cdot m^2 \cdot ^{\circ}C$)

Una vez que se halló la potencia mínima, se dividió entre el número de bandas a utilizar (dos) y con ello se seleccionaron bandas comerciales que entregasen la potencia necesaria para el proceso de plastificación.

4.3.2.6. Selección y validación de la soldadura

El proceso de soldadura que se seleccionó para los procesos de unión permanente en la máquina es el proceso SMAW (Soldadura de arco metálico protegido). Se seleccionó este tipo de soldadura por las siguientes razones: disponibilidad del equipo, aplicabilidad a una amplia variedad de metales, las diversas posiciones de soldadura que pueden emplearse, por ser un proceso recomendado para soldar piezas de gran espesor y por el conocimiento propio de los diseñadores para utilizar este proceso.

a) Validación de soldadura de la viga

Para la validación de la soldadura de la viga, debido a la nueva carga suministrada se utilizaron los siguientes valores de área y segundo momento del área, $A = 2,13 \times 10^{-3} m^2$ y $I = 6,31 \times 10^{-3} m^4$ (Emerson & Patrón, 2017).

Luego se calculó el esfuerzo cortante primario (ecuación 35) y el esfuerzo cortante nominal (ecuación 36).

$$\tau' = \frac{V}{A} \quad (35)$$

De dónde,

V= Fuerza cortante en N
A= Área de la garganta en m²

$$\tau'' = \frac{Mc}{I} \quad (36)$$

Entonces, se realizó la combinación vectorial entre ambos esfuerzos para obtener la ecuación 37.

$$\tau = \sqrt{\tau'^2 + \tau''^2} \quad (37)$$

Luego así, usando la ecuación 38 se obtuvo el esfuerzo de fluencia mínimo que debe aportar el material de la soldadura.

$$\tau = \frac{\tau_{perm}}{n} \quad (38)$$

De donde,

n= Factor de seguridad
 τ_{perm} = Esfuerzo cortante permisible

Ahora bien, de acuerdo con la tabla 9-4 (Budynas & Nisbett, 2008) se tiene la ecuación 39.

$$\tau_{perm} = 0,6 \times S_y \quad (39)$$

Reemplazando la ecuación 38 en la ecuación 39, se obtuvo la ecuación 40 con la cual se halla el factor de seguridad que ofrece la soldadura de la viga con las nuevas condiciones de esfuerzo cortante presente. El valor de S_y para el electrodo usado (E6011) se tomó del catálogo de propiedades mecánicas de West Arco S.A.S.

$$n = \frac{0,6 * Sy}{\tau} \quad (40)$$

Entonces, se validará correctamente la soldadura de la viga si esta resulta con un valor de factor de seguridad superior a 1.

b) Soldadura en el cilindro de plastificación

Para la soldadura que mantiene unido el cilindro de plastificación a la placa superior se utilizó la ecuación 41, para seleccionar el electrodo según el esfuerzo cortante presentado en la soldadura.

$$\tau = \frac{V * 1,414}{hl} \quad (41)$$

Donde,

τ = Esfuerzo cortante presentado en la soldadura

V= Fuerza cortante

h= Garganta de la soldadura

l= Longitud del cordón

c) Soldadura entre columna y buje

Para la selección de la soldadura entre la columna y el buje, al presentarse solo un esfuerzo axial, se utilizó la misma metodología de soldadura que en el cilindro de plastificación, es decir, se implementó la ecuación 41.

4.3.2.7. Selección de pernos

Con el fin de aprovechar los orificios roscados de la mesa de soporte, se seleccionó un perno con el mismo diámetro y rosca que el de los actuales del equipo de troquelado y

embutido (3/8" rosca ordinaria). Las propiedades del material del perno se muestran en el ANEXO K.

La longitud del sujetador se halló de acuerdo con lo consignado a continuación:

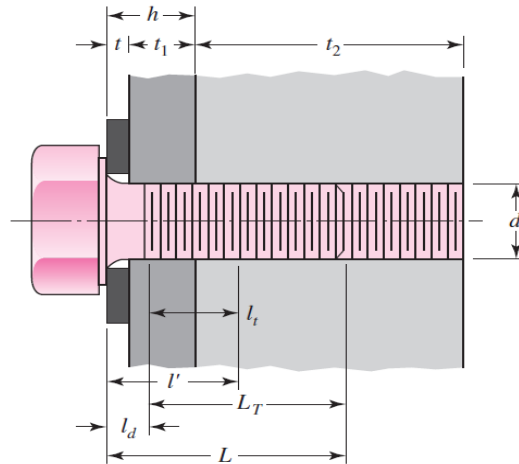


Figura 12. Procedimiento sugerido para determinar la rigidez del sujetador.

Fuente: Diseño de máquinas de Shigley (Budynas & Nysbet, 2008)

De acuerdo con la representación gráfica de la figura 12, y con la ecuación 42 se obtuvo el valor para la longitud de estos sujetadores; la longitud hallada se llevará hasta el tamaño comercial más cercano.

$$L > h + 1,5d \quad (42)$$

De dónde,

L= Longitud del sujetador roscado.

h= Espesor de la arandela y ancho del primer material aprisionado.

d= Diámetro del sujetador roscado.

Por otra parte, para calcular la resistencia del nuevo perno se utilizó la misma metodología empleada para la validación de pernos antiguos, es decir, se halló el factor

de seguridad ofrecido por el perno al relacionar la fuerza máxima de inyección, el esfuerzo de fluencia del material del perno y el área del mismo; dicho factor de seguridad será tomado por los diseñadores como apto si es mayor a 1.

El cálculo se realizó para el perno que se encuentra en la condición de esfuerzo más crítica, es decir, el perno que sostiene la placa inferior a la mesa de soporte. Al ser cuatro de estos pernos y ser iguales, se realiza el cálculo para uno solo de ellos. La fuerza máxima actuante es equivalente a 15,37 kN.

4.3.2.8. *Diseño del torpedo de inyección*



Figura 13. Esquema del torpedo de inyección.

Fuente: Autores, 2019.

El torpedo de inyección cuenta con una longitud de 176 mm y 3 secciones transversales tal como se muestra en la figura 13. La zona 4 (la que tiene contacto directo con el material termoplástico) se hizo con esa forma geométrica dos razones:

1. Con la geometría cilíndrica final y con la parte inferior totalmente plana, se obtiene menor área de contacto del torpedo con el material y con ello se tiene menor resistencia y/o dificultad al momento de avanzar en el cilindro de plastificación.

2. En la parte superior del cilindro de plastificación se forma una capa de polipropileno con mayor viscosidad y pellets aun en estado sólido (véase figura 14a), a diferencia del material que se encuentra en la parte inferior de este; ese material no es deseado en la pieza final por ende cuando el torpedo se desplace hacia el final esa capa queda estancada en el cono y ahí puede hacer correctamente la transición de estado (figura 14b).

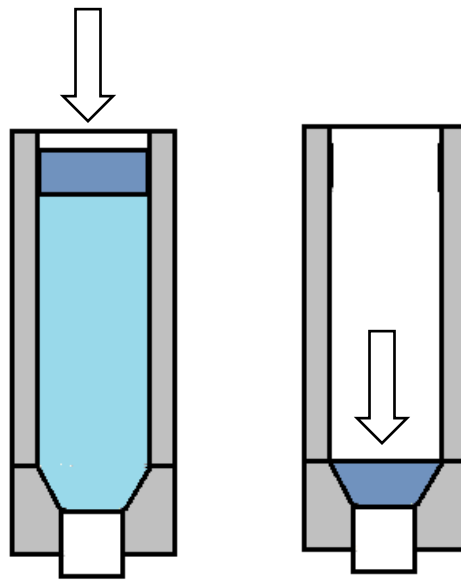


Figura 14. a) material con mayor viscosidad en la parte superior. b) material con mayor viscosidad desplazado hasta el cono del cilindro.

Fuente: Autores, 2019.

Ahora bien, inicialmente se halló la dilatación térmica superficial que sufre el elemento al entrar en contacto con la temperatura, esto se hace con el fin de establecer el diámetro inicial del torpedo para que cuando se dilate no quede obstruido en el interior del cilindro de plastificación, la ecuación utilizada se muestra a continuación:

$$S = (S_o) * (1 + \beta * \Delta T) \quad (43)$$

De donde,

S = Área o superficie final

S_0 = Área o superficie inicial

β = Coeficiente de dilatación térmica superficial, ($35,6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para acero inoxidable)

ΔT = Delta de temperatura

Adicionalmente, se realizó un análisis estático de elementos finitos mediante el software de diseño mecánico Solidworks® 2015 para evaluar la resistencia a compresión del torpedo de inyección. Para la simulación se ubicó la fuerza de 61,51 kN en la cara plana del torpedo de la zona 4 y se tomó como geometría fija la cara de la zona 1 (dónde se une el torpedo con el acople).

En ese orden de ideas, se estableció una malla estándar con 4 puntos jacobianos, con un total de 43918 elementos con tamaño de 2,7792 mm y 64374 nodos para completar las condiciones de la simulación.

De acuerdo con los resultados arrojados por el software en cuanto a esfuerzo de Von Mises, factor de seguridad y desplazamientos, se validó la aptitud del elemento para el equipo de inyección. Con el valor máximo de esfuerzo de Von Mises arrojado en la simulación se realizó una comparación con el límite elástico del material del torpedo y al ser el primero igual o menor al segundo se valida correctamente el elemento. Además, se valida el elemento si en la simulación se obtiene un factor de seguridad superior a 1 en y se obtienen desplazamientos inferiores a 0,1 mm en el torpedo de inyección. Finalmente, se generaron planos de construcción de los nuevos elementos diseñados y de la máquina en general.

4.4. CONSTRUCCIÓN

Una vez obtenido el diseño final, se llevó a cabo la construcción de los elementos conformantes de la máquina. Inicialmente, se realizó la compra de insumos, partes y materiales recurriendo a los servicios de varios proveedores y distribuidores, tanto locales como regionales y nacionales; después se realizaron los procesos de manufactura involucrados en cada uno de los elementos, para lograr obtener las medidas consignadas en los planos de construcción. La construcción de varios elementos se llevó a cabo por los diseñadores en el laboratorio de materiales y procesos de la universidad de Córdoba, con asesorías de los ingenieros Elkin Medellín, Marcos Osorio y Jaime Villada; a su vez se realizaron algunos procesos con mano calificada en el taller “Granja industrial” de la ciudad de Montería. Finalmente, se comprobó el estado de las conexiones hidráulicas, del banco hidráulico y de la parte eléctrica de los elementos de temperatura y de control, a fin de disponer de un prototipo de inyectora de polipropileno funcional para las pruebas de uso y validación.

4.5. VALIDACIÓN

Para la validación de la máquina se realizaron los pasos que se enuncian a continuación:

1. *Pruebas de inyección de la máquina sin usar el molde inyección.* Este proceso se realizó para validar el funcionamiento de la máquina; además, se realizó para medir valores de temperatura entregada por las resistencias y tiempo de calentamiento de los pellets, con el fin de establecer parámetros en los que el material polimérico no se quemara, se quedara en estado sólido o se estancara en la cavidad del cilindro de plastificación.

Se identificó como material quemado todo aquel que al salir de la boquilla de inyección se observe total o parcialmente con hollín.

2. *Pruebas de inyección de la máquina utilizando el molde de inyección.* Se llevó a cabo el proceso de inyección completo, teniendo en cuenta los parámetros de temperatura y tiempo obtenidos previamente. Este proceso se realizó en distintas ocasiones para obtener piezas poliméricas sin defectos; dichos defectos se mencionan en la tabla 7.

Tabla 7. Defectos de piezas poliméricas inyectadas.

DEFECTO	DESCRIPCIÓN	METODO DE VALIDACIÓN
Dimensiones incorrectas	Falta de material en la pieza producida por contracción, llenado incompleto o rechupes.	Observación detallada, medición mediante calibrador pie de rey.
Porosidades	Agujeros distribuidos en la superficie de la pieza y en el interior de la misma.	Observación detallada, corte transversal y comparación de la masa teórica con la masa obtenida de la pieza.

Fuente: Autores, 2019.

Adicionalmente, para esta validación se tuvo en cuenta la ecuación 44 y con ella se determinó el tiempo de solidificación, el cual representa el tiempo requerido para que el material solidifique dentro de las cavidades del molde y poder extraer la pieza moldeada, en el ANEXO L se muestran valores típicos para algunos termoplásticos.

$$ts = \frac{-S^2}{2 \times \pi \times \varphi} \ln \left[\frac{\pi(Tx - Tm)}{4(Tc - Tm)} \right] \quad (44)$$

Dónde,

ts= Tiempo de solidificación en s

S= Espesor máximo de la pieza en cm

Φ= Difusividad térmica del material (cm²/s)

Tx= Temperatura de deflexión/distorsión térmica (HDT) en °C

Tm= Temperatura del molde en °C

Tc= Temperatura del material fundido en °C (Temperatura a la cual hay transición del

material de sólido a líquido)

La difusividad térmica se halla a través de la siguiente ecuación:

$$\Phi = \frac{\text{Conductividad térmica}}{\text{Calor específico} * \text{densidad del material}} \quad (45)$$

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1.DISEÑO DE LA MÁQUINA DE INYECCIÓN TIPO VERTICAL PARA POLIPROPILENO

5.1.1. Validación de elementos antiguos

5.1.1.1. Validación del cilindro hidráulico doble efecto

Inicialmente se halló el valor de la fuerza al interior del cilindro de plastificación.

$$F = (\pi \times (19,05 \text{ mm})^2) * (38,6 \text{ MPa})$$

$$F = 44007,54 \text{ N}$$

Entonces, considerando la presión máxima entregada por la bomba hidráulica de 101,97 kgf/cm² (10 MPa) se obtuvo qué:

$$D = \sqrt{\frac{4 * (44007,54 \text{ N})}{\pi * (100 \text{ MPa})}}$$

$$D = 74,9 \text{ mm}$$

Entonces así, el diámetro interno mínimo que debe tener el cilindro hidráulico para realizar el proceso de inyección del polipropileno es de 75 mm.

El cilindro hidráulico doble efecto del equipo de troquelado y embutido vertical cuenta con un diámetro interno de 88,5 mm, por lo cual se optó por usar este cilindro para el trabajo de inyectar. En la figura 15 se muestra el cilindro validado.



Figura 15. Cilindro hidráulico doble efecto validado

Fuente: Román & Patrón, 2017.

a) *Fuerza generada por el cilindro*

Al ser el diámetro interno del cilindro hidráulico más grande que el diámetro hallado, se hace necesario calcular la fuerza que es realmente generada por el cilindro; para ello, inicialmente, se halló el área interna del cilindro hidráulico.

$$A = \pi \times \frac{D^2}{4} = \pi \times \frac{(88,5 \text{ mm})^2}{4}$$

$$A = 6151,43 \text{ mm}^2$$

Entonces, la fuerza máxima de trabajo del cilindro es:

$$F_{m\acute{a}x} = P * A$$

$$F_{m\acute{a}x} = \left(10 \frac{N}{mm^2}\right) (6151,43 mm^2) = 61,51 kN$$

Finalmente, la fuerza máxima de trabajo que realiza el cilindro hidráulico es de 61,51 kN. Con esta fuerza se realizó toda serie de cálculos en los que se involucrase fuerza máxima de trabajo, es decir, con este valor se logró diseñar los componentes mecánicos de la máquina.

5.1.1.2. Validación de la mesa de soporte

Se evaluó la actual mesa de soporte de la máquina troqueladora y embutidora para determinar si cumple con los requisitos para soportar los elementos que contiene en totalidad la máquina inyectora para polipropileno. Para ello, lo primero que se realizó fue un análisis estático del elemento.

a) Análisis estático

Inicialmente, se consideraron los pesos de las distintas partes que componen la máquina para calcular el espesor mínimo de la mesa, los diagramas resultantes de este análisis se muestran a continuación:

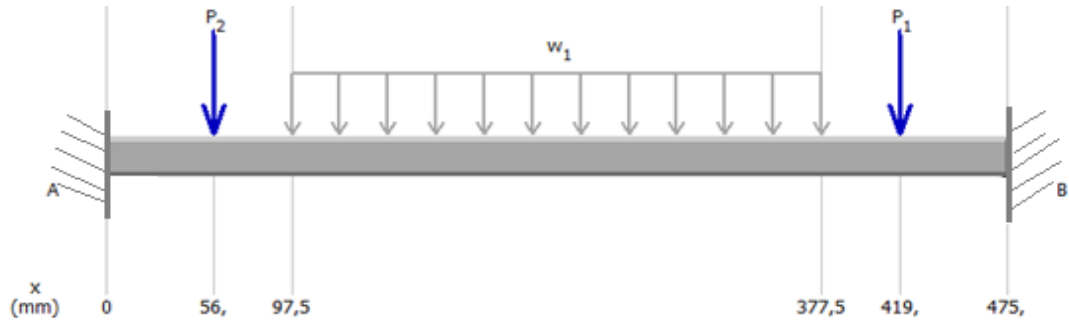


Figura 16. Diagrama de cuerpo libre para la mesa de soporte considerando el peso de los elementos.

Fuente: Autores, 2019. Imagen tomada de Md Solids®

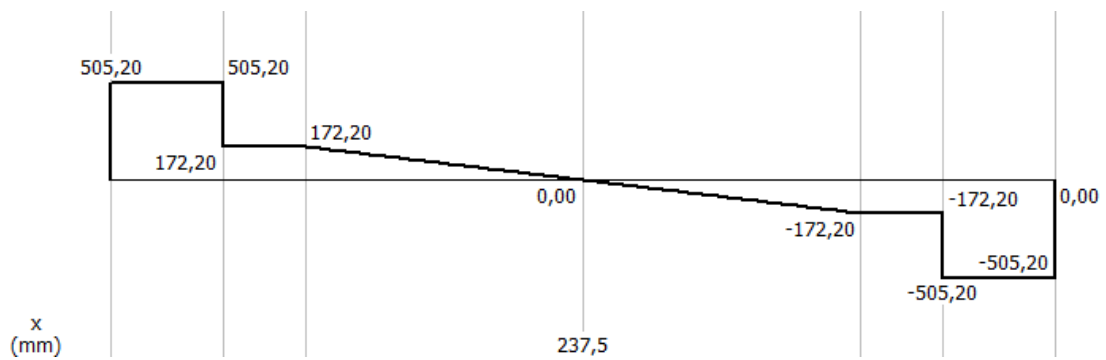


Figura 17. Diagrama de cortante para la mesa de soporte considerando el peso de los elementos.

Fuente: Autores, 2019. Imagen tomada de Md Solids®

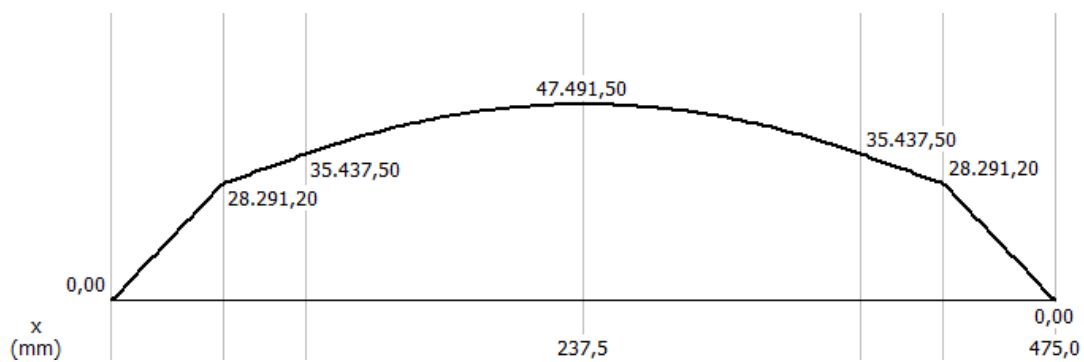


Figura 18. Diagrama de momento flector para la mesa de soporte considerando el peso de los elementos.

Fuente: Autores, 2019. Imagen tomada de Md Solids®

Entonces, el valor del espesor mínimo corresponde a:

$$h = \sqrt{\frac{6(47491,5 \text{ N} * \text{mm})}{(475\text{mm})(250\text{MPa})}} = 1,55\text{mm}$$

Se observa que el espesor de la mesa considerando el peso de los elementos es de 1,55 mm.

En ese orden de ideas, se analizó la mesa considerando la fuerza actuante para el proceso de inyección. Los diagramas resultantes de este análisis se muestran a continuación:

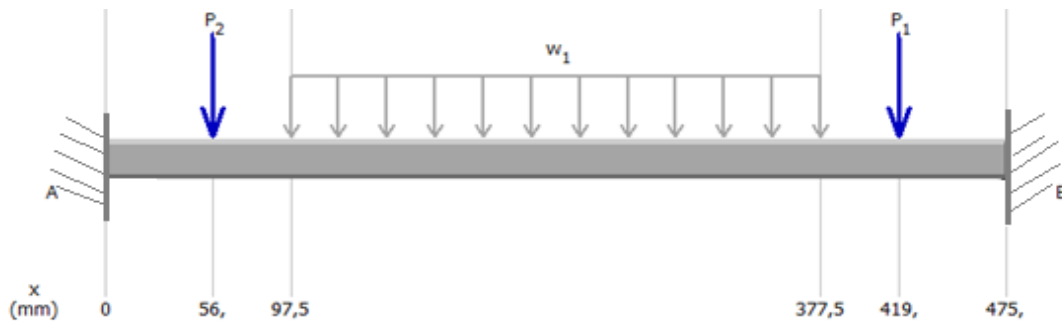


Figura 19. Diagrama de cuerpo libre de la mesa de soporte.

Fuente: Autores, 2019. Imagen tomada de Md Solids®

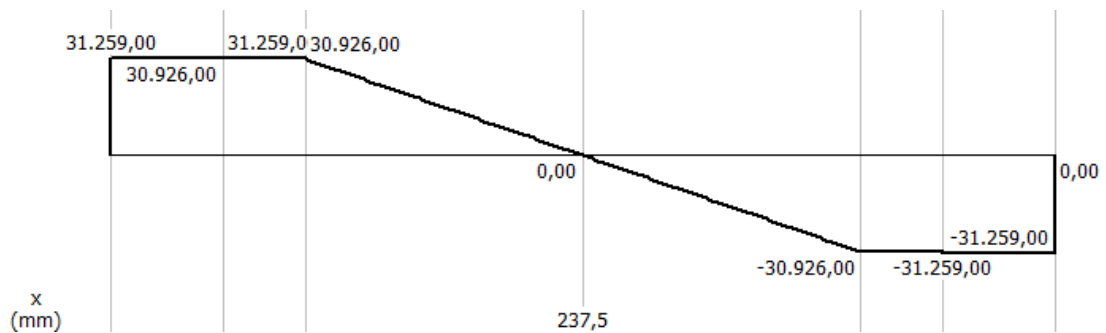


Figura 20. Diagrama de fuerza cortante para la mesa de soporte.

Fuente: Autores, 2019. Imagen tomada de Md Solids®

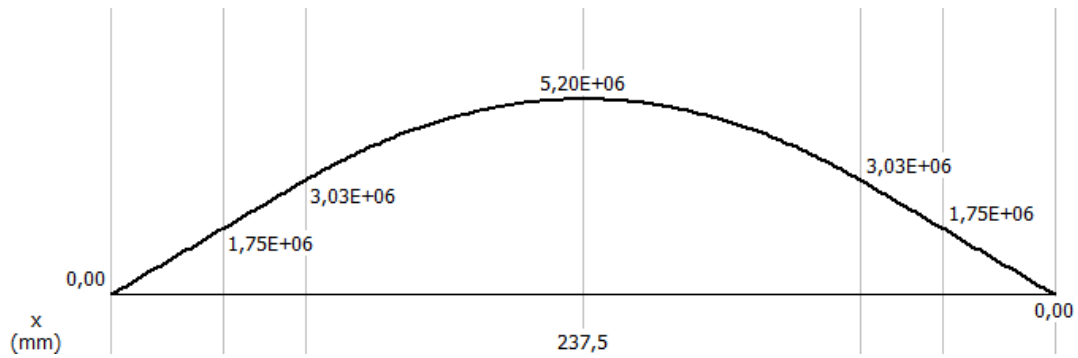


Figura 21. Diagrama de momento flector para la mesa de soporte.

Fuente: Autores, 2019. Imagen tomada de Md Solids®

b) Análisis de fluencia

Teniendo en cuenta el valor de momento máximo obtenido de $5,20 \times 10^6$ N*mm, la fuerza de inyección, el esfuerzo de fluencia del ASTM A36, la dimensión de la base de la placa, se halla el factor de seguridad que brinda la mesa de embutido y troquelado.

$$\frac{M_c}{I} = \frac{S_y}{n}$$

$$n = \frac{h^2 * \sigma * (475mm)}{6M}$$

$$n = \frac{19.05^2 * 250MPa * (475mm)}{6(5,20 * 10^6)} = 1,38$$

Finalmente, teniendo en cuenta un factor de seguridad de 1,38 es válido afirmar que el espesor de la mesa de la máquina embutidora y troqueladora de 19,05 mm es apta para utilizarse en la máquina inyectora de plásticos, es decir, la mesa soportará los elementos que la inyectora necesita para su estructura y/o funcionamiento.

5.1.1.3. Validación de pernos

Los pernos pertenecientes al equipo de troquelado son 3/8" UNC, grado 5 con un esfuerzo de fluencia de 460 MPa y la fuerza de inyección 15,37 kN al estar dividida en 4, se tiene que:

$$A_t = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} * (9,1875 \text{ mm}) = 71,25 \text{ mm}^2$$

$$n = \frac{S_y * A_t}{F_{iny}} = \frac{460 \text{ Mpa} * 71,25 \text{ mm}^2}{15377,5 \text{ N}} = 2,13$$

Finalmente, se puede afirmar que los pernos son aptos para el uso en la máquina inyectora de polipropileno tipo vertical. En la figura 22 se muestra el perno validado.



Figura 22. Perno validado la máquina inyectora de polipropileno de tipo vertical.

Fuente: Autores, 2019.

5.1.1.4. Validación de la viga tipo cajón

Los resultados de la simulación se muestran en las figuras 23 a 25.

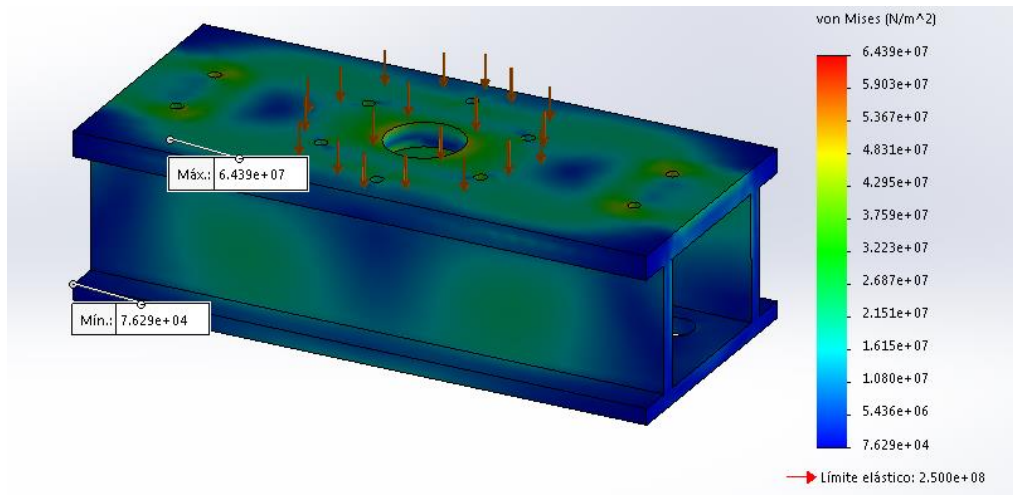


Figura 23. Esfuerzo de Von Mises - simulación de la viga cajón.

Fuente: Autores, 2019. Imagen tomada de Solidworks® 2015

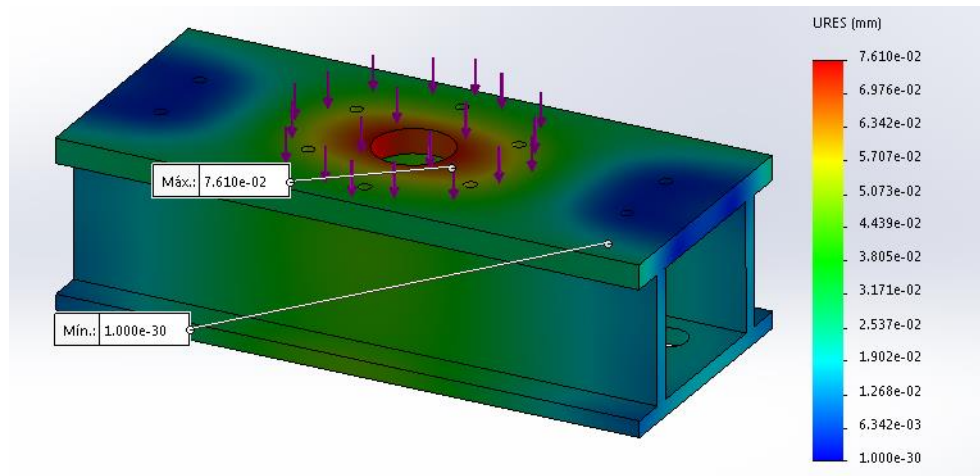


Figura 24. Desplazamientos - simulación de la viga cajón.

Fuente: Autores, 2019. Imagen tomada de Solidworks® 2015

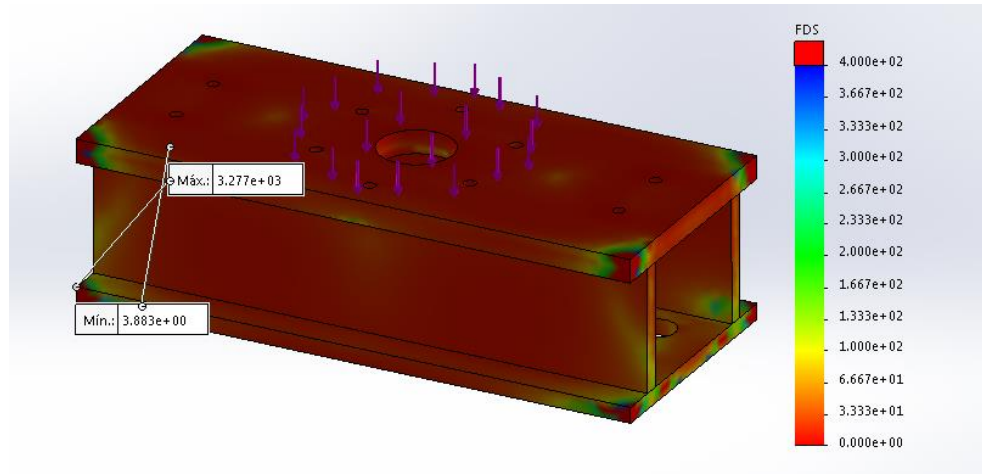


Figura 25. Factor de seguridad - simulación de la viga cajón

Fuente: Autores, 2019. Imagen tomada de Solidworks® 2015

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante el análisis de elementos finitos se determinó que la viga cajón puede utilizarse sin inconvenientes para la máquina de inyección de polipropileno, puesto que cumple de manera satisfactoria las condiciones de validación planteadas en la metodología, en otras palabras, el esfuerzo de Von Mises es menor al límite elástico del material, el mínimo factor de seguridad es de 3,9 que es mucho mayor a 1 y el máximo desplazamiento es menor al planteado de 0,09 mm que es inferior a 0,1 mm. En la tabla 8 se consignan los valores máximo y mínimo arrojados por las simulaciones.

Tabla 8. Resultados de la simulación realizada de la viga cajón

Factores	Valor mínimo	Valor máximo
Esfuerzo de Von Mises	7,629e+04 N/m ²	6,439e+07 N/m ²
Desplazamientos	0,000e+00 mm	7,610e-02 mm
Factor de seguridad	3,883e+00	3,277e+03

Fuente: Autores, 2019.

5.1.2. *Diseño de nuevos elementos*

5.1.2.1. Selección de materiales

Esta selección se hizo con base en propiedades seleccionadas por los diseñadores para cada elemento y su respectiva condición. Cabe resaltar, que con los cálculos de diseño planteados para cada pieza se valida la decisión tomada por los diseñadores.

a) Columnas

Se realiza una búsqueda del material para las columnas, lo cual se resume en lo consignado en la tabla 9. Debido a la configuración inicial de la troqueladora, se requiere que la presentación comercial de las columnas sea cilíndrica.

Tabla 9. Selección del material para las columnas

PROPIEDAD	MATERIAL		
	AISI 1020	AISI 316	AISI 1045
Disponibilidad comercial en Mont.	Buena	Buena	Buena
Geometría comercial	si	si	si
Esfuerzo de fluencia	220 MPa	205 MPa	310 MPa
Costos	bajo	medio	medio

Nota: Los costos se toman con referencia al valor asociado al acero ASTM A36. Bajo: indica precio por debajo de este, medio: indica costo mayor y alto: indica costo mucho mayor.

Fuente: Autores, 2019.

Entonces, de acuerdo con la información depositada por la tabla anterior se realiza un análisis por parte de los diseñadores para encontrar el material idóneo para los soportes verticales; y con ello se llega a la conclusión que el material seleccionado para las columnas de la máquina inyectora es el AISI/SAE 1045, cuyas propiedades y composición se muestran en el ANEXO F.

b) Boquilla de inyección

Se realiza una búsqueda para el material de la boquilla de inyección, cuyo resumen de propiedades y materiales se muestra en la tabla 10; cabe resaltar que para este elemento uno de los criterios más importantes es la presentación comercial en barra hexagonal.

Tabla 10. Selección del material de la boquilla de inyección

PROPIEDAD	MATERIAL		
	AISI 316	AISI 1045	AISI 1020
Disponibilidad comercial en Mont.	Buena	Mala	Alta
Geometría comercial	no	no	si
Esfuerzo de fluencia	205 MPa	310 MPa	220 MPa
Resistencia a corrosión	alta	baja	baja

Fuente: Autores, 2019

Finalmente, se realiza un análisis de la información planteada, y la decisión tomada por los diseñadores fue optar por el material AISI/SAE 1020 puesto que con él se obtiene en gran medida las características deseadas, la composición química y las propiedades mecánicas de este material se muestran en el ANEXO G.

b) Placas inferior y superior

En la tabla 11 se muestran los criterios considerados por los autores y los materiales preseleccionados para estas placas.

Tabla 11. Selección del material para las placas superior e inferior.

PROPIEDAD	MATERIAL		
	ASTM A36	AISI 1045	SAE 8620
Disponibilidad comercial en Mont.	Buena	Buena	Mala
Presentación comercial	Si	Si	Si
Esfuerzo de fluencia	250 MPa	310 MPa	630 MPa
Costos	bajo	medio	alto

Nota: Los costos se toman con referencia al valor asociado al acero AISI 1020. Bajo= indica precio por debajo de este, medio= indica costo mayor y alto= indica costo mucho mayor.

Fuente: Autores, 2019.

Finalmente, se realiza un análisis de la información planteada y se decidió optar por el material ASTM A36 puesto que con él se obtiene en gran medida las características deseadas, la composición química y las propiedades mecánicas de este material se muestran en el ANEXO H.

c) Torpedo de inyección

Los materiales preseleccionados y los criterios asociados para este elemento se consignan en la tabla 12. Cabe resaltar que los criterios más importantes para este elemento son la resistencia a la corrosión y la dureza.

Tabla 12. Selección del material para el torpedo de inyección.

PROPIEDAD	MATERIAL		
	AISI 304	ASTM 1045	AISI 1518
Disponibilidad comercial en Mont.	Si	Si	Si
Resistencia a la corrosión	alta	baja	media
Dureza	208 HB	163 HB	180 HB
Esfuerzo de fluencia	205 MPa	310 MPa	490 MPa

Fuente: Autores, 2019.

Finalmente, luego de un análisis de lo ofrecido por cada material, se tomó la decisión de escoger al acero inoxidable 304 por tener el mayor esfuerzo de fluencia de los materiales comparados, su alta resistencia a la corrosión y buen acabado superficial. Las propiedades de este material se consignan en el ANEXO I.

5.1.2.2. Diseño y dimensionamiento del cilindro de plastificación

Inicialmente, se halló el volumen de inyección máximo.

$$V = \frac{120 \text{ gramos}}{0,91 \text{ gramos/cm}^3} * 1,1$$

$$V = 146,6 \text{ cm}^3 \approx 146600 \text{ mm}^3$$

Al no contar con un valor para el volumen exacto que se muestra en la tabla 13, se interpolaron valores para hallar la relación de radios.

Tabla 13. Interpolación de la relación de radios para el cilindro de plastificación.

Volumen máximo de inyección en cm^3	63	125	146.6	250
Relación b:a	1,6	1,7	1,71	1,8

Fuente: Autores, 2019.

El diámetro interno corresponde a 38,1 mm, entonces así:

$$\text{Diámetro externo} = 38,1 \text{ mm} * 1,71 = 65,15 \text{ mm}$$

Inicialmente se optó por seleccionar el diámetro externo de 65,15 mm para el diseño, pero después de un proceso de optimización se llegó a la respuesta que el diámetro a utilizar es de 56 mm. Dicho proceso de optimización consistió en realizar iteraciones en Microsoft Excel dónde se disminuyó el diámetro exterior asegurando un factor de seguridad que estuviese en un rango de 1 a 2, teniendo especial cuenta de buscar en el mercado barras tubulares que además tuvieran diámetro interno cercano a 38,1 mm lo cual se hizo con el fin de minimizar el proceso de maquinado.

Ahora bien, no se mostrarán todas las iteraciones realizadas sino los cálculos hechos con el valor de 56 mm.

Primero que todo se halló la distribución de tensión tangencial.

$$\sigma_t = \left(393,72 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) \left(\frac{0,28^2 + 0,1905^2}{0,28^2 - 0,1905^2} \right) \text{cm}^2$$

$$\sigma_t = 1072,33 \frac{kg}{cm^2} \approx 105,16 MPa$$

Y la distribución de tensión radial,

$$\sigma_r = 393,72 \frac{kgf}{cm^2} \approx 38,61 MPa$$

Seguidamente, se hallaron componentes de los esfuerzos tangenciales

$$\sigma_{tm} = \frac{(105,16 MPa) + 0}{2} = 52,58 MPa$$

$$\sigma_{ta} = \frac{(105,16 MPa) - 0}{2} = 52,58 MPa$$

Y los componentes de los esfuerzos radiales.

$$\sigma_{rm} = \frac{(38,61 MPa) + 0}{2} = 19,305 MPa$$

$$\sigma_{ra} = \frac{(38,61 MPa) - 0}{2} = 19,305 MPa$$

Se usó la teoría de Von Mises de tensiones biaxiales y se hallaron los esfuerzos medios y alternantes.

$$\sigma'_m = \sqrt{(52,58 MPa)^2 - (52,58 MPa)(19,305 MPa) + (19,305 MPa)^2}$$

$$\sigma'_m = 46,06 MPa$$

$$\sigma'_a = \sqrt{(52,58 MPa)^2 - (52,58 MPa)(19,305 MPa) + (19,305 MPa)^2}$$

$$\sigma'_a = 46,06 MPa$$

Ahora bien, se utilizó el método tradicional para seleccionar la clase de material, se indagó en trabajos de investigación relacionados y se seleccionó el acero para dicha finalidad. En la tabla 14 se muestran algunos aceros que fueron preseleccionados para el cilindro de plastificación.

Tabla 14. Esfuerzo último y Esfuerzo de fluencia de los materiales preseleccionados.

ACEROS				
Propiedades mecánicas	AISI 1518	AISI 4140	AISI 1045	ASTM A36
S_{ut}	590 MPa	461 MPa	588 MPa	440 MPa
S_y	416 MPa	333 MPa	372 MPa	250 MPa

Fuente: Autores, 2019

Entonces, se realizaron los cálculos para determinar el factor de seguridad para cada uno de los materiales, iniciando con el acero AISI 1518.

a) *Acero AISI 1518*

Inicialmente se halló el límite de fatiga,

$$S'_e = 0.5 S_{ut}$$

$$S'_e = 0,5 * (590 MPa) = 295 MPa$$

Se ingresaron los valores en la ecuación que sigue, y entonces:

$$S_e = (0,584) \times (1) \times (0,85) \times (1) \times (0,702) \times (1) \times (295 MPa)$$

$$S_e = 104,06 MPa$$

A continuación,

$$S_a = \frac{104,06 \text{ MPa}}{1 + \frac{104,06 \text{ MPa}}{416 \text{ MPa}}} = 83,23 \text{ MPa}$$

Finalmente, se halló el factor de seguridad.

$$n = \frac{83,23 \text{ MPa}}{46,06 \text{ MPa}}$$

$$n = 1,806$$

Del mismo modo, se hallaron los factores de seguridad para cada material y se consignaron en la Tabla 15.

Tabla 15. Factores de seguridad entregados por cada uno de los aceros evaluados.

FACTOR DE SEGURIDAD			
AISI 1518	AISI 4140	AISI 1045	ASTM A36
1,806	1,63	1,76	1,503

Fuente: Autores, 2019.

Ahora bien, el factor de seguridad constituye un criterio importante para la selección del material del cilindro de plastificación, pero no es el aspecto determinante. Para decidir el material a seleccionar se usará una matriz de pesos ponderados. En la Tabla 16 se muestran los criterios, su abreviación, su valor base y la naturaleza de su propiedad.

Tabla 16. Criterios para la selección del material del cilindro de plastificación.

CRITERIO	ABREV.	NATURALEZA	CARACT.	VALOR BASE
Factor de seguridad	n	Cuantitativa	Max.	1,806
Soldabilidad	S	Cuantitativa	Máx.	5
Disponibilidad comercial en la zona	DC	Cualitativa	Máx.	5
Trabajo en caliente	TC	Cualitativa	Máx.	5

Fuente: Autores, 2019.

Cabe resaltar que para los criterios cuantitativos la asignación de 1 a 5 significa lo siguiente: 1= Deficiente, 2= Mala, 3= Regular, 4= Buena, 5= Excelente. Ahora bien, ya definidos los criterios, una vez maximizados y minimizados se procede a realizar la matriz de selección (Tabla 17).

Tabla 17. Matriz para selección del material del cilindro de plastificación.

MATERIAL	n	S	DC	TC	TOTAL
	40%	15%	25%	20%	100 %
AISI 1518	1,00	1,00	0,60	0,80	0,86
AISI 1045	0,90	0,75	0,80	0,80	0,8325
AISI 4140	0,97	0,75	0,80	0,60	0,8205
ASTM A36	0,83	1,00	1,00	0,40	0,812

Fuente: Autores, 2019.

De acuerdo con los resultados obtenidos de la matriz antes enunciada, el material seleccionado para el cilindro de plastificación es el AISI/SAE 1518, la composición química y las propiedades mecánicas de este material se muestran en el ANEXO J. Dicho material cumple en mayoría con los criterios asignados por los diseñadores para la selección, brindando un factor de seguridad, soldabilidad y una disponibilidad comercial alta, además de un comportamiento aceptable al estar sometido a calor.

5.1.2.3. Cálculo del diámetro de la boquilla de inyección

Se determinó el diámetro interno de la boquilla de inyección, como se muestra a continuación:

$$D = \sqrt{\frac{1.273 * (0,0001466 \text{ m}^3)}{5}} = 0,0061 \text{ m}$$

Finalmente, se seleccionó una boquilla con diámetro interno de 6 mm.

5.1.2.4. Diseño de las columnas de soporte

a) Columnas principales

a.1) Análisis estático

De acuerdo con la figura 9, entonces:

$$\sum fy = 0$$

$$R1 + R2 - FC = 0$$

Sabiendo que R1 y R2 son iguales al ser equidistantes, y FC es el peso combinado de cilindro y viga cajón, entonces:

$$FC = (30 \text{ kg} + 20 \text{ kg}) \left(9,81 \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right) = 490,5 \text{ N}$$

Despejando,

$$2R1 - FC = 0$$

$$R1 = \frac{FC}{2}$$

$$R1 = \frac{490,5 \text{ N}}{2} = 245,3 \text{ N}$$

Entonces así, el Pestático1 de cada columna corresponde al valor de R1 dividido entre dos.

$$P_{estático1} = \frac{R1}{2}$$

$$P_{estático1} = \frac{245,3 N}{2} = 122,65 N$$

Ahora bien, teniendo en cuenta la figura 10 se tiene que:

$$\sum fy = 0$$

$$-R3 - R4 + Fm = 0$$

Sabiendo que R3 y R4 son iguales al ser equidistantes, y Fm es la fuerza máxima del cilindro hidráulico, entonces:

$$-2R3 + Fm = 0$$

$$R3 = \frac{Fm}{2}$$

$$R3 = \frac{61,51 kN}{2} = 30,75 kN$$

Ahora bien, teniendo en cuenta que son 4 las columnas que realizan la labor de dar soporte vertical a la máquina, se dividió el valor obtenido para R3 entre dos y se multiplicó por un factor de seguridad de 1,5 para determinar la carga que soporta cada columna (Pestático2).

$$P_{estático2} = \frac{R1}{2} * 1,5$$

$$P_{estático2} = \frac{30,75 kN}{2} * 1,5 = 23,06 kN$$

a.2) Análisis de pandeo de columnas

Se halló inicialmente la longitud efectiva de la columna.

$$Le = 0,5 * 680 \text{ mm}$$

$$Le = 340 \text{ mm} = 0,34 \text{ m}$$

Seguidamente, el radio de giro del elemento se determinó a continuación.

$$Rmin = \sqrt{\frac{\frac{\pi}{4} \times (0,015875 \text{ m})^4}{(\pi \times (0,015875 \text{ m})^2)}}$$

$$Rmin = 7,9375 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Se determinó la relación de esbeltez.

$$SR = \frac{(0,34 \text{ m})}{7,9375 \times 10^{-3} \text{ m}}$$

$$SR = 42,83$$

Y, la constante de columna.

$$Cc = \sqrt{\frac{2 \times \pi^2 \times 207000 \text{ MPa}}{310 \text{ MPa}}}$$

$$Cc = 114,80$$

Ahora bien, se realizó la comparación entre el valor de la constante de la columna y la relación de la esbeltez para determinar si es larga o corta.

$$SR < Cc$$

$$42,83 < 114,80$$

Entonces, se concluyó que la columna es CORTA y se utilizó la ecuación de J. B. Johnson.

$$P_{critica} = 791,73 \text{ mm}^2 * 310 \text{ MPa} \left[1 - \frac{310 \text{ MPa} * \left(\frac{340 \text{ mm}}{7,9375 \text{ mm}} \right)^2}{4 * \pi^2 * 207000 \text{ MPa}} \right]$$

$$P_{critica} = 228,35 \text{ kN}$$

Al comparar los resultados, se observa que $P_{estático} < P_{crítica}$. Con esto se comprueba que las columnas soportarán una carga más pequeña que la carga crítica y por lo tanto no sufrirán pandeo.

b) Columnas secundarias

b.1) Análisis estático

De acuerdo con la figura 11, se tiene que:

$$\sum f_y = 0$$

$$-R_1 - R_2 + FM = 0$$

Sabiendo que R_1 y R_2 son iguales al ser equidistantes bajo condiciones ideales, y además que FM corresponde a la fuerza máxima entregada por el cilindro hidráulico, entonces:

$$-2R_1 + FM = 0$$

$$R_1 = \frac{FM}{2}$$

$$R1 = \frac{61,51 \text{ kN}}{2} = 30,76 \text{ kN}$$

Se multiplicó el valor obtenido por un factor de seguridad de 1,5 para determinar la carga que soporta cada columna.

$$P_{estático} = 30,76 \text{ kN} * 1,5$$

$$P_{estático} = 46,13 \text{ kN}$$

b.2) Análisis de pandeo de columnas

Se halló inicialmente la longitud efectiva de la columna.

$$Le = 0,5 * 270 \text{ mm}$$

$$Le = 135 \text{ mm} = 0,135 \text{ m}$$

Seguidamente, el radio de giro del elemento se determinó a continuación.

$$Rmin = \sqrt{\frac{\frac{\pi}{4} \times (0,01905 \text{ m})^4}{(\pi \times (0,01905 \text{ m})^2)}}$$

$$Rmin = 0,009525 \text{ m}$$

Se determinó la relación de esbeltez.

$$SR = \frac{(0,135 \text{ m})}{0,01905 \text{ m}}$$

$$SR = 14,17$$

Y, la constante de columna.

$$Cc = \sqrt{\frac{2 \times \pi^2 \times 207000 \text{ MPa}}{310 \text{ MPa}}}$$

$$C_c = 114,80$$

Ahora bien, se realiza la comparación entre el valor de la constante de la columna y la relación de la esbeltez para determinar si es larga o corta.

$$SR < C_c$$

$$14,17 < 114,80$$

Entonces, se concluye que la columna es CORTA y se utilizó la ecuación de J. B. Johnson.

$$P_{critica} = 1140,092 \text{ mm}^2 * 310 \text{ MPa} \left[1 - \frac{310 \text{ MPa} * \left(\frac{135 \text{ mm}}{9,525 \text{ mm}} \right)^2}{4 * \pi^2 * 207000 \text{ MPa}} \right]$$

$$P_{critica} = 350,7 \text{ kN}$$

Al comparar los resultados, se observa que $P_{estático} < P_{critica}$. Con esto se comprueba que las columnas soportarán una carga más pequeña que la carga crítica, por ende, es acertado decir que no fallaran por pandeo.

5.1.2.5. Cálculo de la potencia necesaria para la generación de calor a través de las bandas

Inicialmente, se hallará la cantidad de calor, para ello se encontró el flujo másico que viene dado por los gramos a inyectar y el tiempo en segundos que duren los pellets en proceso de calentamiento, los diseñadores seleccionaron 120 segundos con el fin de disminuir la potencia de la resistencia tipo a banda a seleccionar; para llevar a cabo este proceso.

$$\dot{m} = \frac{(0,12 \text{ kg})(3600 \text{ h})}{(120 \text{ seg})}$$

$$\dot{m} = 3,6 \text{ kg/h} \approx 7,92 \text{ lb/hora}$$

El contenido de calor es:

$$Q_1 = (7,92 \text{ lb/h}) * 300 \text{ btu/lb}$$

$$Q_1 = 2376 \text{ btu/hora} \approx 598,79 \text{ kcal/h}$$

Ahora bien, despejando la temperatura exterior se obtiene que:

$$T_s = T_p + \frac{(\ln \frac{r_0}{r_1})(Q_1)}{2 \times \pi \times l \times K}$$

$$T_s = 260 \text{ }^\circ\text{C} + \frac{(\ln \frac{0,028 \text{ m}}{0,01905 \text{ m}})(598,79 \text{ kcal/h})}{2 \times \pi \times 0,0145 \text{ m} \times (60 \text{ kcal/h} * \text{m} * \text{ }^\circ\text{C})}$$

$$T_s = 263,4 \text{ }^\circ\text{C}$$

La pérdida de calor por convección se halla a continuación:

$$Q_2 = (0,031667 \text{ m}^2)(5,368 \text{ kcal/h} * \text{m}^2 * \text{ }^\circ\text{C})(263,4 - 260)^\circ\text{C}$$

$$Q_2 = 40,015 \text{ kcal/hora}$$

Entonces así, se determinó el Qneto.

$$Q_{\text{neto}} = (598,79 \text{ kcal/hora} + 40,015 \text{ kcal/hora}) \times 1,1$$

$$Q_{\text{neto}} = 702,68 \text{ kcal/hora} \approx 772,95 \text{ w}$$

Ahora bien,

$$Potencia/banda = \frac{772,95 \text{ w}}{2}$$

$$Potencia/banda = 386,5 \text{ w}$$

Finalmente, se seleccionaron dos bandas con dimensiones iguales. Diámetro de 60 mm y ancho de 60 mm con una potencia entregada de 430 w. En la figura 26 se muestran las resistencias eléctricas.



Figura 26. Resistencias eléctricas tipo banda seleccionadas.

Fuente: Autores, 2019.

5.1.2.5. Selección de la soldadura

Se obtuvo la garganta de la soldadura de la tabla 18.

Tabla 18. Tamaño de filete de la soldadura (garganta).

Espesor del material de la parte más gruesa a unir mm (plg.)	Tamaño mínimo de la soldadura de filete*	
		d mm
Hasta 6,4 (¼") inclusive		3
De 6,4 a 12,7 (½" – ½")		5
De 12,7 a 19 (½" – ¾")		6
Mayor de 19 (¾")		8

Fuente: Norma Covenin 1618-98

a) Validación de soldadura de la viga

Se halló el esfuerzo cortante, la fuerza cortante que es de 61,51 kN se dividirá en 8 cordones de soldadura

$$\tau' = \frac{61510 \text{ N}/8}{2,13 \times 10^{-3} \text{ m}^2} = 3609741 \text{ Pa} = 3,61 \text{ MPa}$$

El esfuerzo nominal es:

$$\tau'' = \frac{1,414M}{bdh} = \frac{1,414(6074,11 \text{ N} \cdot \text{m})}{(0,108 \text{ m})(0,455 \text{ m})(6,31 \times 10^{-3} \text{ m}^4)} = 27,7 \text{ MPa}$$

Se halló el esfuerzo cortante total,

$$\tau = \sqrt{3,61 \text{ MPa}^2 + 27,7 \text{ MPa}^2} = 27,93 \text{ MPa}$$

Se calculó el factor de seguridad para validar la soldadura de un electrodo E6011, cuyas propiedades mecánicas están consignadas en la tabla 19.

$$n = \frac{0,6 * S_y}{\tau} = \frac{0,6 * 358,53 \text{ MPa}}{27,93 \text{ MPa}} = 7,7$$

De acuerdo con los resultados obtenidos se dice entonces que la validación fue acertada.

Tabla 19. Propiedades mecánicas electrodo E6011.

PROPIEDADES MECÁNICAS TÍPICAS DEL METAL DEPOSITADO	
Resistencia a la tracción	43,5 – 50,5 kg/mm ² (62-72 ksi)
Límite de fluencia	36,5 – 43,5 kg/mm ² (52-62 ksi)
Elongación	22-33%
Resistencia al impacto Charpy en V a -29 °C	27-100 Joules

Fuente: WEST ARCO S.A.S

b) Selección de soldadura del cilindro

Se halló el esfuerzo cortante:

$$\tau = \frac{V * 1,414}{hl} = \frac{61510N * 1,414}{5 * 2\pi * 28mm} = 98,875 MPa = 14322 psi$$

Basados en el esfuerzo cortante y la tabla 19 se escogió un electrodo E6011.

c) Selección de soldadura entre buje y columna

Para el cálculo del esfuerzo cortante, se tomará la fuerza a la mitad debido a que esta se dividirá en las dos columnas, soldadas a los dos bujes.

$$\tau = \frac{V * 1,414}{hl} = \frac{61510N/2 * 1,414}{5 * 2\pi * 28,5mm} = 48,57 MPa = 7044,5n psi$$

Basados en el esfuerzo cortante y la tabla 19 se escogió un electrodo E6011.

5.1.2.6. Selección de pernos

Se cuenta con perno de 3/8" UNC ordinario, la longitud de este perno ha de ser:

$$L > (0,125mm + 19 mm) + 1,5(9,525 mm)$$

$$L > 33,4 mm$$

Por motivos de disponibilidad comercial, se eligió un perno de 2" de longitud. Ahora bien, con un esfuerzo de fluencia de 470 MPa y la fuerza de inyección 15,37 kN se tiene que:

$$A_t = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} * (9,525 mm)^2 = 71,25 mm^2$$

$$n = \frac{S_y * A_t}{F_{iny}} = \frac{470 Mpa * 71,25mm^2}{15377,5N} = 2,13$$

Finalmente, se afirma que este perno es apto el uso destinado en la máquina.

5.1.2.7. Diseño del torpedo de inyección

Al someterse a la temperatura presente en el cilindro de plastificación, la dilatación superficial máxima que sufrirá este elemento es el siguiente:

$$S_o = \frac{S}{(1 + \beta * \Delta T)}$$

$$S = \frac{\pi}{4} * D^2 = \frac{\pi}{4} * (38,1)^2 = 1140,091 \text{ mm}^2$$

$$S_o = \frac{1140,091 \text{ mm}^2}{(1 + 35,6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} * (280^\circ\text{C} - 28^\circ\text{C}))} = 1129,9 \text{ mm}^2 \approx 1130 \text{ mm}^2$$

Se halló el diámetro de la pieza cuando se encuentra dilatada:

$$S_o = \frac{\pi}{4} * D_o^2 = 1130 \text{ mm}^2$$

$$D_o = \sqrt{\frac{4 * S_o}{\pi}} = \sqrt{\frac{4(1130)}{\pi}} = 37,93 \text{ mm}$$

Para efectos de seguridad se tomó el valor de 37,9 como diámetro mayor del torpedo, el cual al dilatarse alcanzará una medida aproximadamente de 38,1 mm.

Ahora bien, los resultados que se obtuvieron en la simulación se muestran desde la figura 27 a la 29.

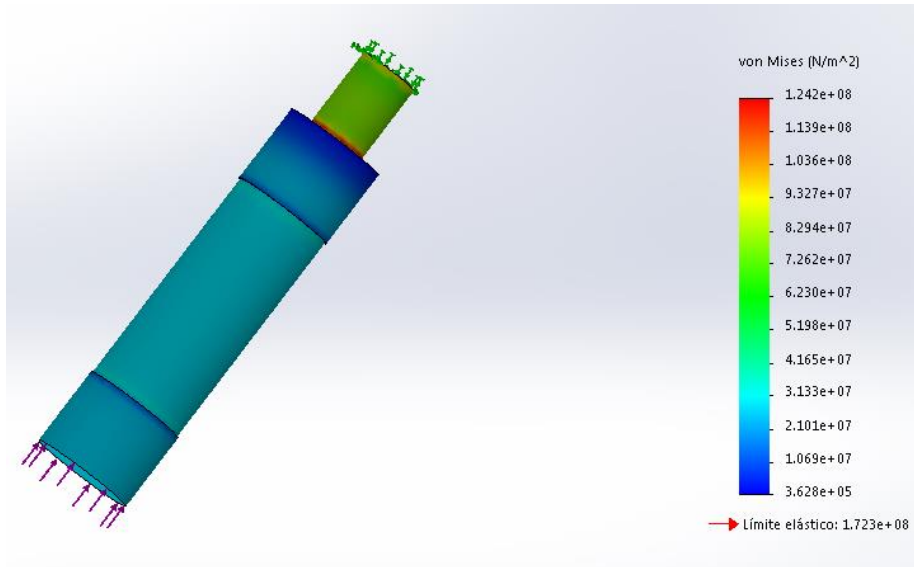


Figura 27. Esfuerzo de Von Mises - simulación torpedo de inyección.

Fuente: Autores, 2019. Imagen tomada de Solidworks® 2015.

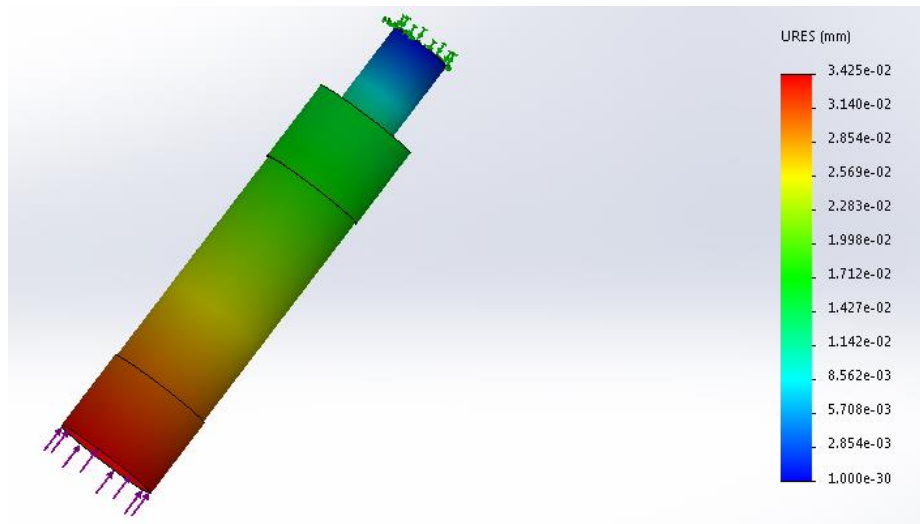


Figura 28. Desplazamientos - simulación del torpedo de inyección.

Fuente: Autores, 2019. Imagen tomada de Solidworks® 2015.

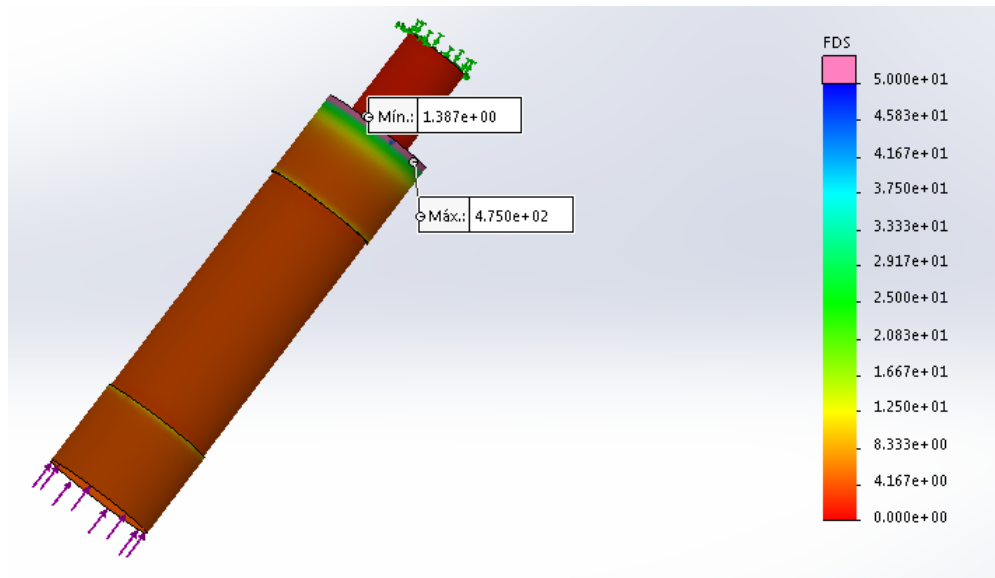


Figura 29. Factor de seguridad - simulación del torpedo de inyección.

Fuente: Autores, 2019. Imagen tomada de Solidworks® 2015.

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante el análisis de elementos finitos se determinó que el diseño del torpedo de inyección es acertado puesto que cumple de manera satisfactoria las condiciones de validación planteadas en la metodología, en otras palabras, el esfuerzo de Von Mises es menor al límite elástico del material, el mínimo esfuerzo de seguridad es de 1,3 que es un valor superior a 1 y el máximo desplazamiento es menor al planteado de 0,05 mm. En la tabla 19 se consignan los valores máximo y mínimo arrojados por las simulaciones.

Tabla 19. Resultados obtenidos en la simulación del torpedo de inyección.

	Valor mínimo	Valor máximo
Esfuerzo de Von Mises	3,628e+05 N/m ²	1,242e+08 N/m ²
Desplazamientos	0.000e+00 mm	3,425e-02 mm
Factor de seguridad	1,387e+00	4,750e+02

Fuente: Autores, 2019.

En la tabla antes descrita se observa un factor de seguridad con un valor máximo y un valor mínimo (1,37 y 475 respectivamente), mediante la simulación se estudia el comportamiento de los nodos de la pieza al ser sometidos a una fuerza determinada, entonces así un factor de seguridad máximo representa que en un nodo el esfuerzo aplicado es mucho menor al esfuerzo de fluencia del material, es decir, por allí la pieza no se quebraría o fallaría. En caso contrario, el factor de seguridad mínimo representa que en un nodo en específico el esfuerzo aplicado es mayor al esfuerzo de fluencia del material y, en consecuencia, por allí la pieza podría fallar.

5.2. CONSTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA INYECTORA DE PLÁSTICOS

TIPO VERTICAL

En esta etapa se hace referencia a todos los procesos de manufactura que se involucraron para obtener los elementos y piezas que hacen parte de la máquina de inyección vertical, la cual tiene capacidad de inyectar piezas de hasta 120 gramos.

Para la construcción de ésta se siguió una metodología general que incluyó: la compra de elementos (insumos, materia prima y partes eléctricas/electrónicas), el desmontaje de piezas del equipo de troquelado y embutido, el maquinado de piezas y el montaje de todos los elementos conformantes de la máquina.

Dentro de los procesos de manufactura específicos que se aplicaron en la máquina inyectora de polipropileno se encuentran: taladrado, soldadura, fresado, maquinado en torno y machuelado. Cabe resaltar que para llevar a cabo todo esto se tuvo en cuenta el uso de los planos de construcción de la máquina, los planos de los nuevos elementos se encuentran consignados en los anexos.

5.2.2. Montaje de las columnas principales

Inicialmente, se obtuvieron cuatro (4) barras de acero AISI 1045 con las dimensiones establecidas en el plano de construcción de las columnas principales. Lo siguiente que se realizó fue la perforación de ambos lados de las barras con una profundidad de 25,4 mm y diámetro de 9,525 mm; posteriormente se machuelaron estos orificios a fin de obtener la rosca destinada para la unión con los pernos de la máquina.

Una vez preparadas las barras, se procedió al desmontaje de las antiguas columnas del equipo de embutido y troquelado. Se cambió la posición de la máquina de vertical a horizontal con el propósito de facilitar el proceso de separación; utilizando una llave con designación 9/16 se desenroscaron los pernos que mantenían fijas las columnas a la mesa de soporte y a la viga tipo cajón. Al estar los elementos de la troqueladora unidos durante un tiempo considerable, no se pudo realizar el desmontaje de forma fácil; entonces para llevar a cabo dicha desunión se accionó el cilindro hidráulico doble efecto contra una superficie plana y al encontrar oposición contra ella por el principio de acción-reacción este mismo se empujó hacia arriba y se separaron la viga tipo cajón y las columnas de soporte. Luego, el montaje de la viga y el cilindro hidráulico fueron movidos de forma segura hacia un lugar próximo al área de trabajo. En la parte inferior, para llevar a cabo la desunión de las columnas se realizaron pequeños golpes por el orificio del perno y finalmente se logró liberar esos soportes verticales.

Seguidamente, se dispuso el restante del equipo a su forma original, es decir, se levantó la máquina. Se limpiaron los restos de pintura del interior de los bujes y se montaron las

columnas principales, roscándoles a la mesa de soporte. Paso siguiente consistió en alzar la viga cajón, encajarla con las nuevas columnas y colocar los pernos restantes.

En la figura 30 se muestra parte de los procesos realizados para llevar a cabo este montaje.

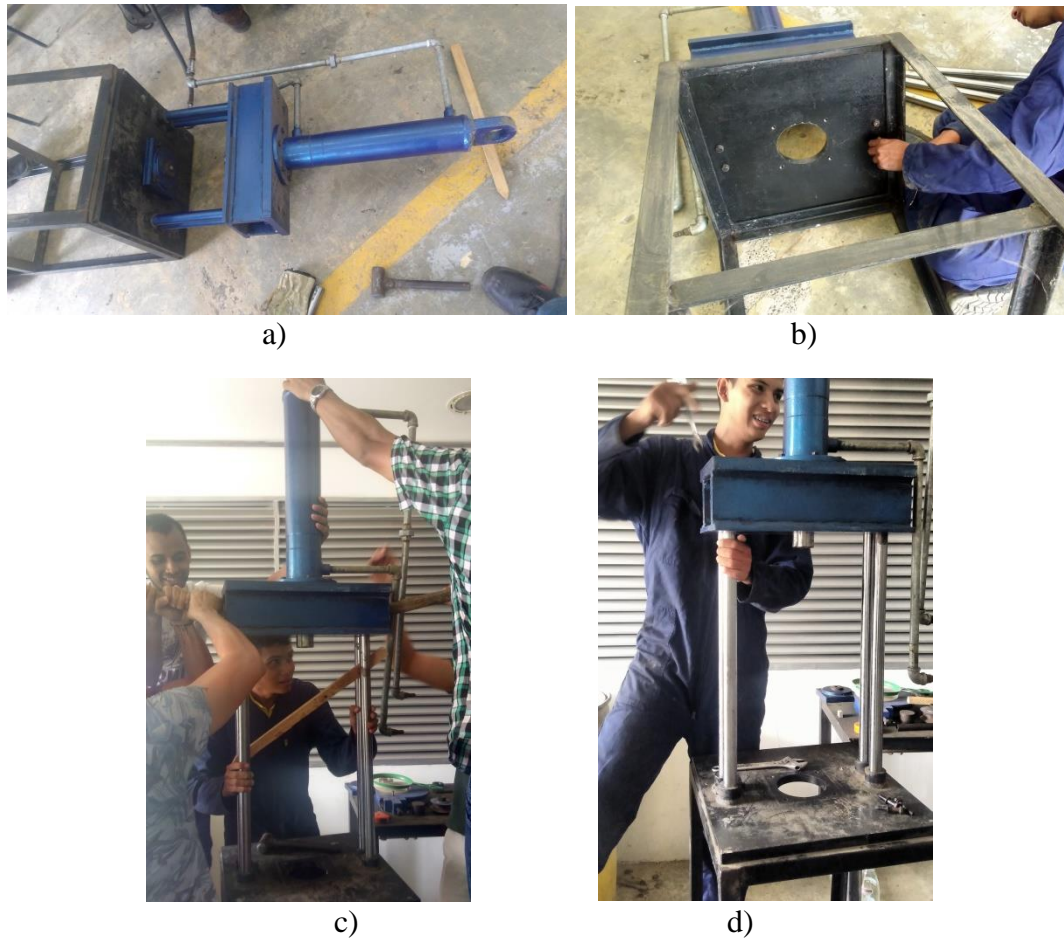


Figura 30. a) Cambio de posición del equipo b) Extracción de pernos c) Acople de las columnas principales a sus limitantes superior e inferior d) Unión final de los pernos a la viga cajón.

Fuente: Autores, 2019.

5.2.3. *Construcción de la estructura secundaria*

La estructura secundaria se compone de los siguientes elementos: columnas secundarias, bujes secundarios, placa inferior y placa superior. Los procesos llevados a cabo para constituir esta estructura se mencionan en la tabla 20.

Tabla 20. Procesos en la construcción de los elementos de la estructura secundaria.

PIEZA	PROCESO	DESCRIPCIÓN
Placa superior	Obtención de material	Acero estructural ASTM A36 en presentación de lámina, dimensiones descritas en el plano.
	Fresado	Se realizó un agujero central completamente circular con diámetro de 57 mm utilizando una fresadora convencional.
	Taladrado	Se hicieron dos perforaciones con broca de 10 mm a ambos lados del agujero central con distancia entre centros de 180 mm.
Columnas secundarias	Obtención de material	Acero AISI 1045 en presentación de barra sólida, dos columnas con longitud de 270 mm.
	Taladrado	Se perforó en una de las caras a las dos barras hasta una profundidad de 25,4 mm.
	Machuelado	Se realizó machuelado a los agujeros para obtener la rosca de 9,525 mm de paso ordinario.
Placa inferior	Obtención de material	Acero estructural ASTM A36 en presentación de lámina, dimensiones descritas en el plano.
	Taladrado	Se realizaron cuatro agujeros pasantes de 10 mm centrados equidistantemente en un círculo de 180 mm de diámetro.
Bujes secundarios	Obtención de material	Acero aleado AISI/SAE 1518 en presentación de barra perforada con longitud de 100 mm, diámetro interno y externo de 37 y 57 mm respectivamente.
	Torneado	Se realizó un proceso de desbaste interno para llevarle hasta un diámetro de 38,2 mm.
	Aserrado.	Se realizaron cortes para obtener cuatro bujes de 22 mm de longitud.

Fuente: Autores, 2019.

Ahora bien, los procesos de unión de estos elementos se describen a continuación:

- ✓ En cada placa (superior e inferior) se unieron dos bujes a una distancia de 180 mm mediante el proceso de soldadura SMAW, se utilizó una garganta de 5 mm, véase figura 31.

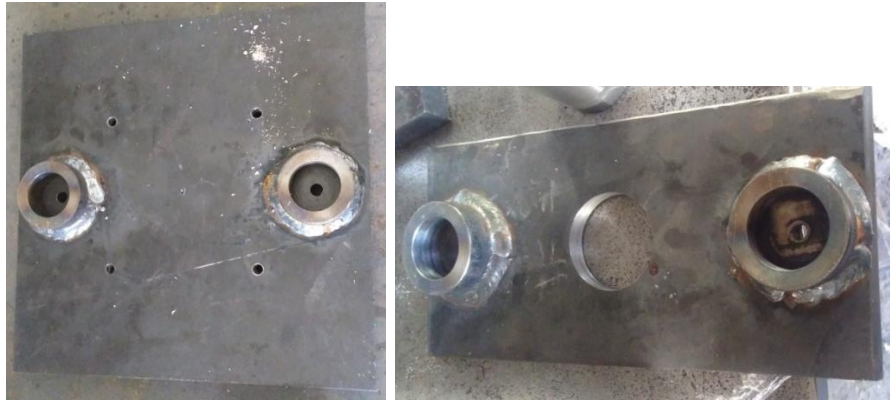


Figura 31. Placas superior e inferior con sus bujes soldados

Fuente: Autores, 2019.

- ✓ La placa inferior se fijó a la mesa de soporte utilizando los pernos de designación 3/8"- 12 UNC.
- ✓ Se introdujeron las columnas secundarias en los bujes de la placa inferior y se soldaron allí mediante el proceso de soldadura SMAW, véase figura 32.



Figura 32. Soldadura de columnas secundarias en los bujes.

Fuente: Autores, 2019.

- ✓ Se posicionó la placa superior en el extremo libre de las columnas y se fijó con pernos de designación 3/8"-12 UNC de 25,4 mm.

Finalmente, esta estructura quedó de la forma que se muestra en la figura 33.



Figura 33. Estructura secundaria.




Fuente: Autores, 2019.




5.2.4. Construcción de la estructura de plastificación

Las piezas mecánicas que conforman esta estructura son: El torpedo de inyección, el cilindro de plastificación, la tolva de alimentación y la boquilla de inyección. Para construir estos elementos se desarrollaron los procesos que se enuncian en la tabla 21, la cual se muestra a continuación:

Tabla 21. Procesos de construcción para los elementos de la estructura de plastificación.

PIEZA	PROCESO	DESCRIPCIÓN
	Obtención de material	Acero al carbono ASTM 1020 en presentación hexagonal con diámetro circunscrito de 25,4 mm y longitud de 35 mm.
	Torneado	Se desbastó en ambos extremos hasta obtener medidas deseadas y se realizó un radio de 5mm en su extremo inferior; se mantuvo una zona hexagonal dispuesta para hacer las veces de tuerca. Se realizó la rosca en el extremo superior de la boquilla, la designación es de 5/8 -18 UNF con longitud de 10 mm.

Boquilla de inyección	Taladrado	<p>Se realizó un proceso de taladrado para obtener el diámetro interno de 6 mm necesario para que el polipropileno fluya al exterior del cilindro de plastificación.</p> <p>Finalmente:</p> 
Torpedo de Inyección	Obtención de material	Acero inoxidable 304 en presentación de barra solida con diámetro de 38,1 mm y longitud de 178 mm.
	Torneado	<p>Se realizó un careado en ambos extremos de la barra para conseguir paralelismo en sus caras.</p> 
		<p>Se realizó un desbaste en uno de sus extremos con una longitud de 31 mm y un diámetro final de 22 mm.</p> 
Obtención de material	<p>Se realizó un proceso de desbaste en la zona de 38,1 mm a hasta llevarlo a 37,9 mm para evitar que la dilatación térmica impida el libre paso del torpedo por el cilindro de plastificación. Adicionalmente se desbastó en la zona central alrededor de 4 mm para que el torpedo no tenga un contacto total con la parte interna del cilindro (solo en los extremos).</p>	
	Obtención de material	<p>Parte cilíndrica hueca: Acero aleado AISI 1518 presentación de barra perforada con longitud de 145 mm y diámetro interno de 37 mm y externo de 57 mm.</p> <p>Parte inferior cónica: Acero AISI 4140 en presentación de barra sólida con diámetro 57,15 mm y altura de 55 mm.</p>
		Se realizó un desbaste interno a la parte cilíndrica hueca hasta llevarle a un diámetro de 38,1 mm y se desbastó

Cilindro de plastificación	Torneado	<p>externamente para eliminar la capa de pintura remanente, se dejó en 56 mm.</p> 
		<p>Se realizó a la <i>parte cilíndrica hueca</i> una rosca fina externa en uno de sus extremos con una longitud de 20 mm.</p>
		<p>Se le realizó a la <i>parte inferior cónica</i> un cono interno con diámetro mayor de 38,1 mm y menor de 6 mm y longitud de 30 mm.</p> <p>Se le realizó a la <i>parte inferior cónica</i> una rosca fina externa en la parte superior con longitud de 20 mm y se le realizó una rosca interna fina con longitud de 25 mm. Finalmente:</p> 
Lijado	<p>Utilizando lijas de diversa denominación se desbastó la <i>parte cilíndrica hueca</i> en su interior a fin evitar que la dilatación térmica afecte el proceso de inyección. Adicionalmente, se dejó pulido el interior.</p> 	

Fuente: Autores, 2019.

Cómo proceso adicional para el cilindro de plastificación, se realizaron muescas en la parte inferior de la *parte inferior cónica* para facilitar el agarre de la herramienta cuando se necesite roscar; el cilindro de plastificación y sus dos partes se pueden observar en la

figura 34. Por otro lado, la tolva de alimentación se obtuvo fabricada, por lo cual no se describen sus procesos de fabricación en la tabla anterior.



Figura 34. Cilindro de plastificación acoplado.

Fuente: Autores, 2019.

Llegados a este punto, los elementos de la estructura de plastificación se unieron a la máquina como se describe a continuación:

- ✓ El cilindro de plastificación se introdujo por el agujero de la placa superior y se posicionó a la altura que se muestra en el plano de construcción. Se soldó de forma circundante en la parte inferior en donde hacen contacto ambos elementos, utilizando el tipo de soldadura SMAW, véase figura 35.

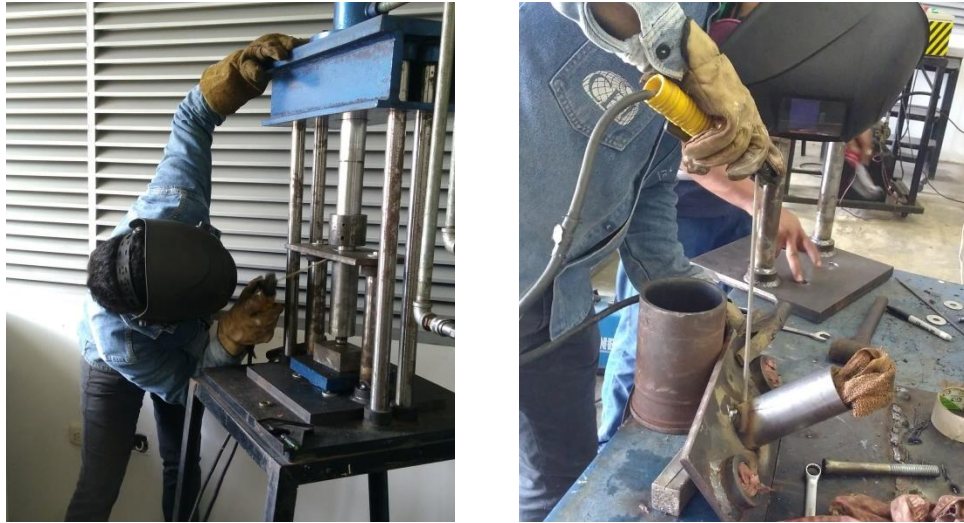


Figura 35. Proceso de soldadura para fijación del cilindro de plastificación a la placa superior.

Fuente: Autores, 2019.

- ✓ La boquilla de inyección se roscó a en la *parte inferior cónica* del cilindro de plastificación utilizando una llave expansiva. Nótese que la boquilla es el macho y el cilindro la hembra, véase figura 36.

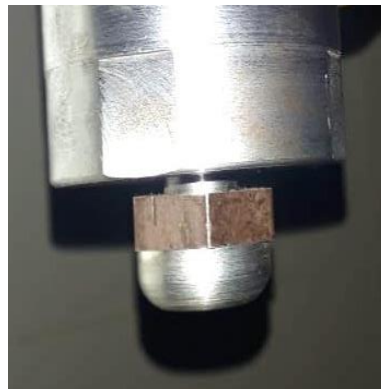


Figura 36. Unión de la boquilla de inyección al cilindro de plastificación.

Fuente: Autores, 2019.

- ✓ El torpedo se introdujo en el acople del cilindro hidráulico doble efecto. Se ingresó la zona del torpedo de menor diámetro en la cavidad de iguales dimensiones del acople y usando una llave tipo Allen se aprisionó esta unión con pernos de cabeza hueca, véase figura 37.

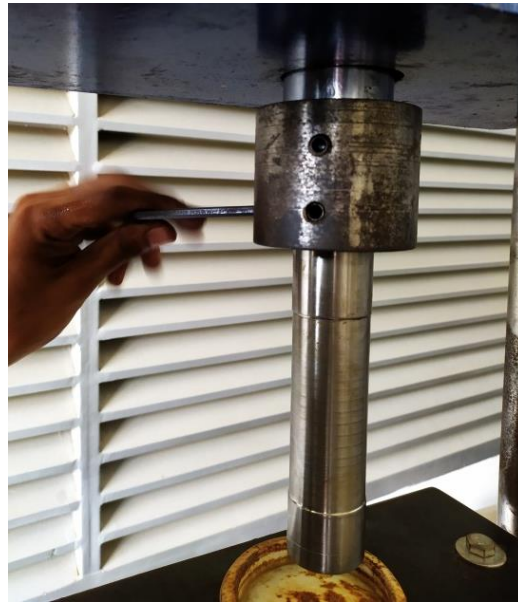



Figura 37. Ubicación y ajuste del torpedo en el acople.

Fuente: Autores, 2019.

5.2.5. Molde de inyección

Los procesos involucrados en la construcción de este molde se resumen en la tabla 20.

Tabla 20. Procesos involucrados en la construcción del molde de inyección.

PROCESO	DESCRIPCIÓN
Obtención del material	<p>Acero estructural ASTM A36 presentación comercial en láminas, dos placas de 50 mm de espesor, 100 mm de ancho y 80 mm de alto.</p> 
Torneado	<p>Se realizó el emparejamiento y se dejó con medidas de 40 mm de espesor, 95 mm de ancho y 70 mm de alto.</p> 
Taladrado	<p>Se realizó el proceso de taladrado no pasante con broca de 10 mm en la parte A del molde para ubicar las hembras de las guías de sujeción. Además, en la parte B se realizaron otras perforaciones para ubicar a los machos.</p>
Machuelado	<p>Se realizó roscado en los agujeros previamente hechos de la parte B, para así incluir 4 pernos de igual longitud y de esta forma fueran el macho del acople.</p>
Fresado	<p>Se realizó fresado de perfiles en ambas partes del molde con el fin de obtener las cavidades para la pieza plástica; adicionalmente se fresó para realizar la entrada de la boquilla de inyección.</p> 

Fuente: Autores, 2019.

Finalmente, se pintan los elementos de la máquina que no están en contacto directo con las resistencias eléctricas, el resultado obtenido se muestra en la figura 38.



Figura 38. Máquina de inyección para polipropileno parcial.

Fuente: Autores, 2019.

5.2.6. Montaje de instrumentos y dispositivos control

Los elementos que entran en este ítem son las termocuplas tipo J, los controladores de temperatura PID, las resistencias eléctricas tipo banda, y el circuito eléctrico de la caja de control (breakers de riel, cable de conexión, conector de 220v y cable termocompresible)

Las resistencias eléctricas tipo banda con un diámetro mínimo de agarre de 60 mm deben rodear el cilindro de plastificación que posee un diámetro de 56 mm, por lo que se usaron camisas metálicas que permitan el ajuste deseado y que el calor llegue por conducción hacía los pellets en el cilindro de plastificación. Las resistencias se ubicaron con una separación de 30 mm entre ellas; las termocuplas se ubicaron en el cilindro de

plastificación en agujeros entre la ubicación de las resistencias eléctricas, véase figura 38. Ambos elementos antes descritos se conectan a los controladores PID.



Figura 39. Resistencias eléctricas y termocuplas tipo j ubicadas en el cilindro de plastificación.

Fuente: Autores, 2019

Los controladores de temperatura se conectan a la alimentación eléctrica de 220v, para evitar daño en los dispositivos de control, se protegen estos mediante dos breakers c20 tipo riel; estos elementos al igual que los cables que conforman el circuito eléctrico se ubican en la caja de control, véase figura 40.



Figura 40. Interior de la caja de control

Fuente: Autores, 2019.

Finalmente, luego de todos los procesos y la instalación de la caja de control la máquina quedó en las condiciones que se muestra en la figura 41.



Figura 41. Máquina inyectora para polipropileno tipo vertical terminada.

Fuente: Autores, 2019.

5.3. VALIDACIÓN

Durante la realización de la validación se utilizaron dos tipos diferentes de polipropileno reciclado, los cuales fueron suministrados mediante por transacción comercial por la empresa Ángel ambiental de la ciudad de Cali. En la figura 42 se observan ambos tipos, el polipropileno reciclado pelletizado y el polipropileno reciclado triturado.




Figura 42. Polipropileno reciclado pelletizado y polipropileno reciclado triturado.

Fuente: Autores, 2019.

5.3.1. Validación sin molde de inyección

Se realizó esta prueba de inyección a fin de establecer tiempos de calentamiento y rangos de temperatura en las resistencias eléctricas para lograr resultados favorables al momento de inyectar. Los resultados obtenidos en esta validación se resumieron en la tabla 21.

Tabla 21. Resultados obtenidos de inyección sin molde.

Producto obtenido	Tiempo	Temperaturas	Resultados
	2 min	250°C y 260 °C	Se obtuvo una masa sin forma definida, el material no presentó mucha fluidez al salir de la boquilla de inyección y mayor viscosidad. No se evidenciaron rastros de hollín que pudiesen indicar sobrecalentamiento.
	2 min	270°C y 280°C	Se obtuvo una masa sin forma definida, en la que se evidenció una fluidez parecida al del primer intento. No se evidenciaron rastros de hollín que pudiesen indicar sobrecalentamiento.
	3 min	270°C y 280°C	Se obtuvo una masa sin forma definida, el material presentó buena fluidez al salir de la boquilla de inyección. No se evidenciaron rastros de hollín que pudiesen indicar sobrecalentamiento.
	5 min	270 °C y 280°C	Se obtuvo una masa sin forma definida, el material presentaba mejor fluidez que las pruebas anteriores y menor viscosidad al salir de la boquilla de inyección. No se evidenciaron rastros de hollín que pudiesen indicar sobrecalentamiento.

Fuente: Autores, 2019.

Finalmente, de acuerdo con los resultados consignados en la tabla anterior se concluyó que el tiempo de sostenimiento idóneo es de 5 minutos y la mayor temperatura de procesamiento para obtener piezas idóneas en este equipo es de 280 °C. En la figura 42 se muestra el proceso de ejecución de la validación.



Figura 43. Prueba de inyección de la máquina inyectora.

Fuente: Autores, 2019

5.3.2. Validación con molde de inyección

Se utilizó un molde de inyección cuya pieza a obtener se muestra en la figura 44, se escogió este diseño por dos razones: obtener una pieza que ocupase un volumen similar al máximo de inyección de la máquina y por ser de las geometrías con más versatilidad y facilidad de realizar en una fresadora convencional.

Las dimensiones generales del molde se muestran en los planos de construcción en los anexos.

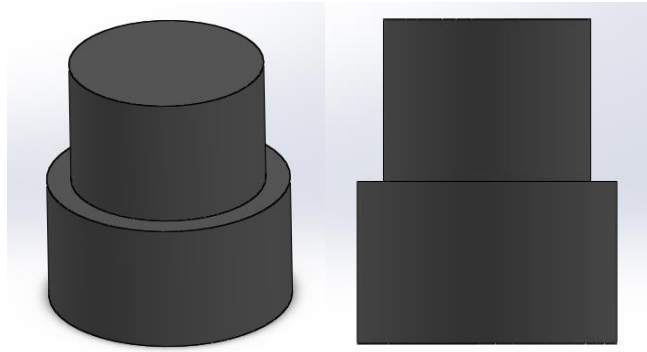


Figura 44. Geometría de la pieza de termoplástico a inyectar.

Fuente: Autores, 2019. Imagen tomada de Solidworks® 2015

En pruebas preliminares sin molde de inyección se varió la temperatura y el tiempo para comprobar quemaduras o sobrecalentamiento en el material y se obtuvieron valores base para las pruebas. Ahora bien, en esta validación se realizó un proceso similar variando parámetros en el procedimiento buscando obtener piezas sin defectos y validar el proceso de inyección.

El tiempo de solidificación teórico de la pieza dentro del molde se muestra a continuación:

$$\Phi = \frac{0,12 \text{ W/m} * K}{(1700 \text{ J/K} * kg)(910 \text{ kg/m}^3)} = 7,76 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$$

$$\Phi \approx 0,000776 \text{ cm/s}^2$$

$$ts = \frac{-(50 \text{ cm})^2}{2 \times \pi \times (0,000776 \text{ cm/s}^2)} \ln \left[\frac{\pi(107 \text{ }^\circ\text{C} - 40 \text{ }^\circ\text{C})}{4(240 \text{ }^\circ\text{C} - 40 \text{ }^\circ\text{C})} \right]$$



$$ts = 1369,75 \approx 22,83 \text{ min}$$



Este tiempo de 23 minutos aproximadamente es el cual debe esperarse para que la pieza solidifique completamente, se obtuvo este resultado debido al espesor que presenta la pieza, el cual puede considerarse grande.

Cabe resaltar que pasados 5 minutos la pieza puede ser retirada del molde, ya que la superficie se encuentra solidificada pero la parte interna no llegará al mismo estado hasta pasado el tiempo mínimo que se calculó; esta información parte de lo aprendido por los diseñadores durante la validación.

Ahora bien, los resultados obtenidos en la validación con molde de inyección se enuncian en la siguiente tabla 22.

Tabla 22. Resultados de la validación con molde de inyección.





#	VAR.	RESULTADO	COMENTARIOS
1	t= 2 minutos T= 240°C y 250 °C		Defectos encontrados: Rechupes en toda la pieza, llenado incompleto, dimensiones incorrectas, burbujas internas. En la primera inyección, al molde de inyección no se le realizó el precalentamiento y se utilizó polipropileno reciclado triturado. Adicionalmente, se realizaron paradas durante la entrada del torpedo hasta la parte inferior máxima y se retiró precipitadamente la pieza del molde estando sin solidificar superficialmente.
2	t= 5 minutos T= 240°C y 250 °C		Defectos encontrados: Rechupes en ambas secciones, llenado incompleto, dimensiones incorrectas. En el segundo intento, se utilizó polipropileno reciclado triturado y no se realizó un precalentamiento del molde. En esta ocasión no se hicieron paradas en el avance del torpedo al momento de inyectar, pero se realizó inmediatamente el retroceso del pistón.

3	<p>t= 5 minutos</p> <p>T= 270 °C y 280 °C</p>		<p>Defectos encontrados: Rechupes en la parte superior de la pieza, llenado incompleto.</p> <p>En el tercer intento, se realizó precalentamiento del molde y se utilizó material polipropileno reciclado y pelletizado. El retroceso del torpedo se realizó una vez que llegó al final del cilindro de plastificación; además se mantuvieron los ventiladores apagados.</p>
4	<p>t= 5 minutos</p> <p>T= 270 °C y 280 °C</p>		<p>No se encontraron defectos en la pieza, por lo tanto, se obtuvo una validación asertiva. Debido al acabado del molde de inyección la superficie de la pieza se muestra con muchas líneas de marca.</p> <p>En este cuarto intento, se realizó un precalentamiento del molde de inyección, se utilizó material polipropileno reciclado y pelletizado. Una vez que ingreso en su totalidad el torpedo a la cámara de plastificación se mantuvo dentro hasta que la pieza en el molde se solidificara superficialmente para evitar que el material se succionara y dejara la pieza con un llenado incompleto tal cómo se evidenció en las piezas anteriores.</p> <p>Además, los ventiladores se mantuvieron apagados durante todo el proceso.</p>

Fuente: Autores, 2019.

En la tabla 23 se muestra la parte interna de las piezas inyectadas, aquí se comprueba lo dicho en la tabla anterior, la pieza #4 obtuvo las mejores características.

Tabla 23. Parte interna de las piezas inyectadas.

PRUEBA	RESULTADO	COMENTARIO
1		<p>Se observa una cavidad interna en la pieza, producto de un llenado incompleto o una burbuja interna.</p>
2		<p>Se observa una gran cavidad en el centro, producto de un llenado incompleto o una burbuja interna.</p>
3		<p>A diferencia de las piezas 3 y 4, no se evidencia una gran cavidad en el cuerpo de la pieza. Se observan pequeñas porosidades producto de burbujas internas.</p>
4		<p>Se observa que esta pieza estuvo no presento porosidades y/o cavidades internas, mostrando un mejor resultado que las tres piezas anteriores.</p>

Fuente: Autores, 2019.

En la figura 45 se realiza una comparación visual de las piezas que se inyectaron en la validación.



Figura 45. Piezas inyectadas con molde de inyección.

Fuente: Autores, 2019.

Continuando con los resultados, se tomaron las medidas de la pieza que resultó en perfectas condiciones y se hizo un comparativo con las medidas del molde, estas se consignaron en la tabla 24.

Tabla 24. Comparación de dimensiones del molde y de la pieza.

Dimensión / Medida	Molde	Pieza inyectada	%diferencia
Diámetro cilindro mayor	50 mm	48,5 mm	3,0
Diámetro cilindro menor	40 mm	38,9 mm	2,8
Longitud sección mayor	30 mm	29 m	3,3
Longitud sección menor	30 mm	29,3 mm	2,3
Longitud total	60 mm	58,3 mm	2,8

Fuente: Autores, 2019.

La diferencia entre las medidas teóricas y las medidas obtenidas que se observan en la tabla anterior se da principalmente por la contracción que sufre la pieza en el molde; para el polipropileno se encuentra en un rango de 1-3%.

Con el fin de garantizar la reproducibilidad de las piezas se inyectó una quinta vez en el mismo molde y el resultado obtenido fue igualmente satisfactorio, se muestra la pieza obtenida en la figura 46.



Figura 46. Segunda pieza obtenida en aptas condiciones

Fuente: Autores, 2019.

Esta pieza se cortó a la mitad 10 minutos después de haber sido inyectada, se evidenció que la parte interna estaba en proceso de solidificación. En la figura 47 se puede observar cómo el proceso de enfriamiento de la pieza ocurre desde el exterior hasta el interior.

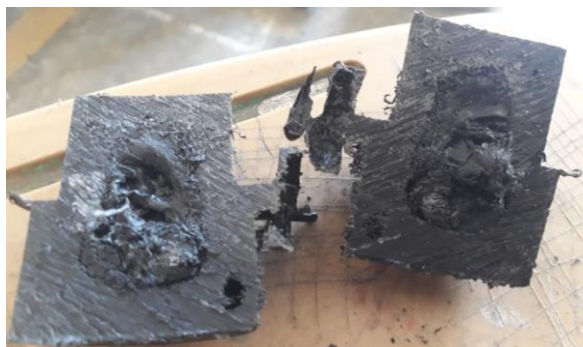


Figura 47. Pieza cortada a la mitad mientras se da el proceso de enfriamiento.

Fuente: Autores, 2019.

Adicionalmente se realizó una inyección con otro molde de inyección y el resultado obtenido se muestra en la tabla 25.

Tabla 25. Pieza resultante del proceso de inyección con otro molde.

RESULTADO	COMENTARIO
	Al realizar esta pieza, se contó con mayor cantidad de material permitido en el molde y ambas partes del mismo no estaban totalmente aprisionadas, por lo que el material se escapó de la cavidad y la pieza presentó rebaba. Se utilizó material polipropileno reciclado triturado, se trabajó a 270°C y 280 °C y los defectos más evidentes que presentó la pieza fueron rebabas y distorsión.

Fuente: Autores, 2019.

6. CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó una máquina de inyección de materiales termoplásticos con disposición vertical para la inyección, el material seleccionado para su uso es el polipropileno y puede inyectar hasta 120 gramos de este material en molde con diversas formas y diseños.

Las condiciones de operación determinantes para la realización del proceso de inyección fueron tiempo y temperatura, el rango de temperatura establecido para esta máquina es 270 °C – 280°C con un tiempo de sostenimiento de dicha temperatura de cinco minutos.

El tipo de material utilizado en la inyección fue importante en el resultado obtenido, se evidenció que con polipropileno reciclado pelletizado se obtuvieron mejores resultados que con el polipropileno reciclado triturado.

Con el fin de garantizar las condiciones internas de las piezas, se cortaron a la mitad, las piezas validadas correctamente no presentaron porosidades internas y/o cavidades; por lo que resulta de gran importancia introducir la cantidad de pellets correcta y utilizar la temperatura de referencia a fin de mantener una fluidez en la salida del material.

La inyección del material se debe realizar de manera constante, sin paradas del pistón en el proceso y sin retrocesos, para evitar que se generen burbujas en el material inyectado, o que el material se regrese debido al vacío generado por el pistón y el cilindro de plastificación.

7. RECOMENDACIONES

Para lograr que el equipo trabaje en condiciones aptas, se recomienda lo siguiente:

- ✓ Adicionar solamente polímeros termoplásticos en la cavidad del cilindro de plastificación.
- ✓ No accionar el retroceso del cilindro hidráulico hasta completar la máxima carrera del vástago, puesto que realizar esto generará que se suelte el acople, se raye el torpedo y a su vez puede ocasionar un incidente.

De acuerdo con los procesos realizados y los resultados obtenidos, se hacen las siguientes recomendaciones de mejora para la máquina inyectora de plásticos tipo vertical:

- ✓ Diseñar y construir un molde con menor volumen para facilitar el proceso, que posea todas las partes que conforman un molde de inyección, con un material y procesos con los que se obtenga un mejor acabado superficial.

- ✓ Diseñar una nueva boquilla de inyección en material que presente mejor resistencia al desgaste.
- ✓ Instalar un tope hidráulico para controlar la bajada del pistón hasta la ubicación máxima de desplazamiento vertical.
- ✓ Obtener resistencias eléctricas de banda con mayor potencia que las actuales para lograr un proceso de calentamiento en menor tiempo, se recomienda la obtención de resistencias eléctricas con núcleo cerrado.

8. GUIA DE PRÁCTICAS

Para el funcionamiento correcto de la máquina inyectora de polipropileno se recomienda atender una serie de preoperacionales y pasos, los cuales se mencionan adelante.

8.1. PROCEDIMIENTO PREOPERACIONAL

Antes de encender la máquina y comenzar el proceso de inyección realice las siguientes actividades:

- ✓ Ubicar la caja de conexión de 220v al lado del equipo de inyección y a su vez conectar al tomacorriente.
- ✓ Desplazar el banco de inyección a una distancia que permita realizar la conexión del sistema hidráulico al cilindro hidráulico efecto.
- ✓ Disponer de la báscula digital sobre una superficie uniforme y cercano a un tomacorriente.
- ✓ Ubicar los sacos con material termoplástico cerca a la máquina de inyección de termoplásticos.
- ✓ Limpiar las cavidades del molde de inyección.

- ✓ Retirar todo elemento del área operacional que pueda afectar el proceso de inyección de la máquina, es decir, retirar elementos no necesarios del área, por ejemplo: servilletas, recipientes que contengan líquidos, papel y comida.
- ✓ Emplear los siguientes elementos de protección personal: Guantes de vaqueta, mascarilla para gases y botas de seguridad.
- ✓ Solicitar una prensa en C de 4” al auxiliar del laboratorio de materiales y procesos.
- ✓ Solicitar las siguientes herramientas al auxiliar del laboratorio de materiales y procesos: Llave de tuercas 9/16, llave de expansión, dos martillos, llaves tipo Allen y pinzas (Estas herramientas son necesarias para ajuste de la máquina si se altera la relación concéntrica del torpedo con el cilindro de plastificación o si ocurre un atascamiento).
- ✓ Apagar el sistema de ventilación del laboratorio de materiales y procesos.

8.2. NORMAS PARA OPERAR LA MÁQUINA INYECTORA DE TERMOPLÁSTICOS TIPO VERTICAL

- ✓ Se realizan las pruebas con un mínimo de dos personas.
- ✓ Utilizar una mascarilla para gases, para evitar la inhalación gases nocivos para la salud provenientes de la cámara de plastificación.
- ✓ Utilizar guantes de seguridad para evitar quemaduras.
- ✓ Evitar el contacto directo de partes del cuerpo con las resistencias eléctricas durante y después del proceso de inyección.
- ✓ No dejar elementos flamables en la máquina mientras se realiza el procedimiento.

8.3. MANUAL DE USO

1. Observe las mangueras hidráulicas y conectores eléctricos para verificar rasguños o roturas, en caso de encontrarlas, informe al auxiliar de laboratorios y procesos para tomar las decisiones pertinentes.

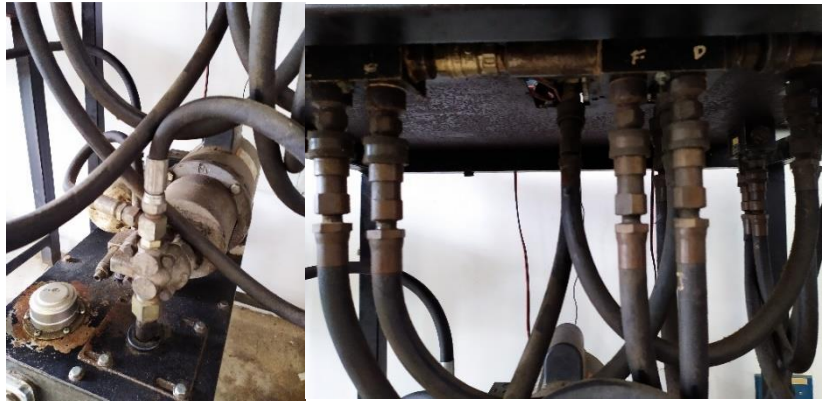


Figura 48. Mangueras y conexiones hidráulicas.

Fuente: Autores, 2019.

2. Conecte las mangueras hidráulicas a las entradas de aceite del cilíndrico doble efecto.



Figura 49. Conexión de las mangueras del banco hidráulico al cilindro doble efecto.

Fuente: Autores, 2019.

3. Identifique la correspondencia de la resistencia de banda y termocupla tipo j con su respectivo controlador de temperatura, es decir, identifique el circuito.
4. Ubique las resistencias eléctricas en su posición, seguidamente ubique las termocuplas en sus respectivos orificios y finalmente de ajuste al agarre de las resistencias.
5. Enchufe el banco hidráulico a tomacorriente de 110v y la caja de controles a un tomacorriente de 220v.



Figura 50. Conexión eléctrica 220v de la caja de control

Fuente: Autores, 2019.

6. Verifique que el torpedo esté completamente introducido y con buen ajuste en el acople, y a su vez se encuentre concéntrico con el cilindro de plastificación para garantizar que entre y salga sin inconvenientes. En caso de encontrarse desalineado, utilizar las herramientas recomendadas en el preoperacional para lograr obtener la relación concéntrica entre torpedo y cilindro.
7. Ubique la tolva de alimentación en la parte superior del cilindro de plastificación tal como se muestra en las figuras.



Figura 51. Ubicación de la tolva de alimentación.

Fuente: Autores, 2019.

8. Medir con la báscula digital la cantidad en gramos de pellets de polipropileno e introducirlos en el cilindro de plastificación. Para el gramaje tener en cuenta la capacidad del molde de inyección y un 20% de material adicional considerando la cantidad que queda retenida en el cono del cilindro.



Figura 52. Medición de la cantidad de material y adición de este en la tolva de alimentación.

Fuente: Autores, 2019.

9. Activar los breakers de la caja de control para encender los controladores y a su vez las resistencias eléctricas.



Figura 53. Breakers para encendido de la caja de control.

Fuente: Autores, 2019.

10. Manipular los controladores para llevarlos hasta las temperaturas determinadas experimentalmente por los diseñadores para polipropileno, estas son:
 - Resistencia eléctrica inferior: 280 °C
 - Resistencia eléctrica superior: 270 °C

En caso de utilizar un material termoplástico diferente al polipropileno, asegúrese de averiguar el rango de temperatura de procesamiento de este; siempre la resistencia eléctrica inferior debe llevar mayor temperatura que la resistencia eléctrica superior.

11. Retirar la tolva de alimentación y ubicar una tapa en la entrada superior del cilindro de plastificación y favorecer el proceso de calentamiento.
12. Realice el precalentamiento del molde, ubicando ambas partes en la placa de soporte del cilindro de plastificación.



Figura 54. Pre calentamiento del molde.

Fuente: Autores, 2019.

13. Luego de alcanzar las temperatura de procesamiento (observe en los controladores los valores son censados por los termopares), espere un tiempo de 5 minutos para inyectar.
14. Coloque las dos partes del molde de inyección en la parte inferior de la máquina aprisionando la boquilla de inyección. Seguidamente use la prensa de sujeción tipo c para asegurar la unión del molde.



Figura 55. Ubicación y apriete del molde de inyección.

Fuente: Autores, 2019.

15. Retire la tapa que mantiene cerrado el cilindro de plastificación.
16. Encienda el banco hidráulico, para ello se debe realizar este procedimiento:

- Asegúrese que la llave de aceite se encuentre en posición cerrada.
- Identifique el botón encendido/apagado del banco ubicado en uno de los soportes verticales de este; oprima el botón **on** y asegúrese que se mantenga hendido.
- Girar la llave de encendido de la caja de mando del banco hidráulico para encenderle.
- Gire la llave de aceite hasta la posición de abierta.

Tabla 25. Procedimiento para encender el banco hidráulico.



Fuente: Autores, 2019.

17. Accione el avance del cilindro hidráulico doble efecto (no realizar paradas hasta introducir completamente el torpedo), mantener el torpedo dentro de la cámara de plastificación mientras la pieza se solidifica en el molde. Finalmente accione el retroceso de este elemento hasta que salga completamente.



Figura 56. Accionamiento del avance del torpedo de inyección.

Fuente: Autores, 2019.

18. Espere el tiempo de enfriamiento de la pieza en el molde (para el molde actual es alrededor de 25 minutos). Desajuste el agarre de la prensa de sujeción tipo c, separe las dos partes del molde de inyección y retire la pieza. La pieza puede retirarse pasados 5 minutos de su inyección del molde, puesto que en ese lapso se encontrará solida superficialmente, se recomienda ubicar la pieza en un lugar ventilado.

Evite sostener la pieza sin protección puesto que corre el riesgo de quemaduras malestar en la mano.



Figura 57. Liberación de la pieza inyectada del molde.

Fuente: Autores, 2019.

19. Si desea realizar otra inyección inmediatamente, se deben realizar nuevamente los pasos del 7 en adelante.
20. Una vez finalizado todo el proceso de inyección, realice la limpieza de la estructura de plastificación.
21. Finalmente, accione los breakers de la caja de control para apagar los controladores y siga el siguiente procedimiento para apagar el banco hidráulico.
 - Asegúrese que el torpedo esté en la parte superior.
 - Gire la llave de encendido de la caja de control para apagarla.
 - Cerrar la llave de aceite del banco hidráulico.
 - Oprimir el botón off para apagar la bomba.

Tabla 26. Procedimiento para apagado del banco hidráulico.

Llave de encendido caja de mando	Posición llave de aceite	Botón On/off
		

Fuente: Autores, 2019.

22. Desconecte todas las conexiones eléctricas.

8.4. LIMPIEZA DE LA ESTRUCTURA DE PLASTIFICACIÓN

La estructura de plastificación se conforma por el cilindro de plastificación, la boquilla de inyección y el torpedo. Entiéndase por limpieza como el retiro de material termoplástico residual en el interior de estos elementos.

La limpieza del cilindro de plastificación y la boquilla de inyección debe realizarse en caliente, es decir, las resistencias eléctricas deben estar encendidas mientras sucede esto. Cabe resaltar que la boquilla no puede ser desenroscada del cilindro mientras se realiza el proceso puesto que el plástico fluirá por la cavidad de la rosca y puede perjudicar la unión de estas dos. El procedimiento se describe a continuación:

1. Accionar el avance del torpedo hasta la posición final, retrocederlo hasta que salga del cilindro y volver accionar el avance con el fin de expulsar el material restante por medio de la presión de aire generada por el cilindro luego mantenerlo allí mientras se expulsa el material restante por la boquilla de inyección.
2. Utilizar un chamizo para retirar el material estancado en el orificio de salida de la boquilla.
3. Realizar el proceso reiteradas veces hasta lograr expulsar completamente el material termoplástico.

Para la limpieza del torpedo se recomienda el siguiente procedimiento:

1. Utilizar un trapo para limpiar los residuos del torpedo que se encuentren aún en estado viscoso.
2. Utilizar un pequeño raspador para retirar el residuo solidificado del torpedo, es decir, retirar la costra. Tener especial cuidado de no aplicar demasiada fuerza en este proceso para no ocasionar rayaduras en el torpedo.

9. GUÍA DE MANTENIMIENTO

9.1. MEDIDAS PREVENTIVAS

Para mantener la máquina funcionando adecuadamente, se recomienda realizar las siguientes verificaciones:

- a. Comprobar el estado de todos los elementos hidráulicos presentes (mangueras, cilindro y válvulas de mando hidráulico). En caso de haber fugas, elimínelas y realice la limpieza del aceite hidráulico.
- b. Comprobar el estado de todos los elementos eléctricos y electrónicos (cables de conexión, termocuplas, cable de alimentación y resistencias eléctricas), en caso de haber peladuras cúbralas con extremo cuidado.
- c. Comprobar que en los diversos elementos de la máquina no haya residuos de material plástico adheridos, en caso de haber, retírelos evitando dejar rayones o raspaduras.
- d. Lubricar el exterior del cilindro de plastificación con aceite para evitar una oxidación progresiva del elemento.
- e. Revisar y apretar todos los pernos de fijación de la estructura.
- f. Realizar un reapriete de todas las conexiones hidráulicas.

Llevar a cabo las anteriores medidas de mantenimiento preventivo con en el fin de obtener la máxima vida del prototipo.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Beer, R. D. (2009). *Mecánica de Materiales* Quinta edición. México: McGraw-Hill.
- Bondini, G., & Cacchi, F. (1994). *Moldes y máquinas de inyección para la transformación de plásticos*. México: Mc Graw-Hill.
- Budynas, R., & Nisbett, J. (2012). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. Novena edición, México: Mc Graw-Hill.
- EAS. (2016). *Moldeo por inyección de plástico*. Recuperado de: <https://easchangesystems.com/es/application/moldeo-por-inyeccion-del-plasticomoldeo-por-inyeccion-del-plastico/>. Fecha de consulta: 12/09/2018.
- Enríquez, A., & Lincango, G. (2015). *Diseño y construcción de una máquina para inyección de plástico, con capacidad de fabricación de hasta 15g de peso para el laboratorio de procesos de manufactura del DECEM*. Tesis pregrado, Universidad de las fuerzas armadas, Sangolquí. Recuperado el 14/09/2018 de <https://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/10328>.
- Jiménez, E. (2017). *¿Cuánto plástico hay en el mundo?* Recuperado de: <http://archivo-es.greenpeace.org/espana/es/Blog/cunto-plastico-hay-en-el-mundo/blog/59905/>. Fecha de consulta: 12/09/2018.
- Martínez, P., Molina, D., & Rivera, A. (2002). *Diseño y construcción de una máquina de inyección de termoplásticos para fines didácticos*. Tesis pregrado, Universidad de El Salvador, Ingeniería Mecánica, San Salvador. Recuperado el 10/09/2018 de <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/4997/1/Dise%C3%B1o%20y%20construcci%C3%B3n%20de%20una%20m%C3%A1quina%20de%20inyecci%C3%B3n%20de%20termopl%C3%A1sticos%20para%20fines%20did%C3%A1cticos.pdf>.
- Paucar, J. (2007). *Diseño y construcción de un prototipo de una máquina inyectora de plástico de 30 bares de presión*. Tesis pregrado, Escuela politécnica del Ejército, Ingeniería en electrónica, automatización y control industrial, Sangolquí. Recuperado el 14/09/2018 de <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/682>.
- Perchy, Y., & Donney's, E. (1980). *Diseño y construcción de una máquina inyectora de 80 gramos de capacidad*. Tesis pregrado, Universidad Autónoma de Occidente, Ingeniería Mecánica, Cali. Recuperado el 10/09/2018 de <http://red.uao.edu.co:8080/handle/10614/4644>.
- Sánchez, S., & Yáñez, I. (2005). *Moldeo por Inyección de Termoplásticos*. Primera edición, México: Limusa, S.A.
- Shackelford, J. (2005). *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*. Sexta edición. España. Editorial: Pearson Education, Inc.

Tecnova. (2018). *Fuerza de cierre (clamping force)*. Recuperado de: http://www.tecnovasa.com/hoja_calculo.html. Fecha de consulta: 11/02/2019.

Valle, A. (2017). “*El consumo per cápita del plástico en Colombia es de 24 kilos al año*”: *presidente Acoplásticos*. Recuperado de: <https://fierrosindustrial.com/noticias/la-industria-esta-avanzando-en-empaque-envases-ecoamigables-presidente-acoplasticos/>. Fecha de consulta: 12/09/2018.

Waganoff, N. (1969). *Transformación de los plásticos*. Primera edición, Argentina: Librería Mitre.

11. ANEXOS

Anexo A. Valores de la presión de inyección para algunos Polímeros obtenidos mediante la práctica.

Fuente: Tecnova.

Resina	ton/in ²	ton/cm ²
PS (GPPS)	1.0 - 2.0	0.155 - 1.31
PS (GPPS) (paredes delgadas)	3.0 - 4.0	0.465 - 0.62
HIPS	1.0 - 2.0	0.155 - 0.31
HIPS (paredes delgadas)	2.5 - 3.0	0.388 - 0.543
ABS	2.5 - 4.0	0.388 - 0.62
ABS (SAN)	2.5 - 3.0	0.388 - 0.465
ABS (SAN) (flujos largos)	3.0 - 4.0	0.465 - 0.62
LDPE	1.0 - 2.0	0.155 - 0.31
HDPE	1.5 - 2.5	0.233 - 0.388
HDPE (flujos largos)	2.5 - 3.5	0.388 - 0.543
PP (Homo / Copolímero)	1.5 - 2.5	0.233 - 0.388
PP (H/Co) (flujos largos)	2.5 - 3.5	0.388 - 0.543
PPVC (blando)	1.5 - 2.5	0.233 - 0.388

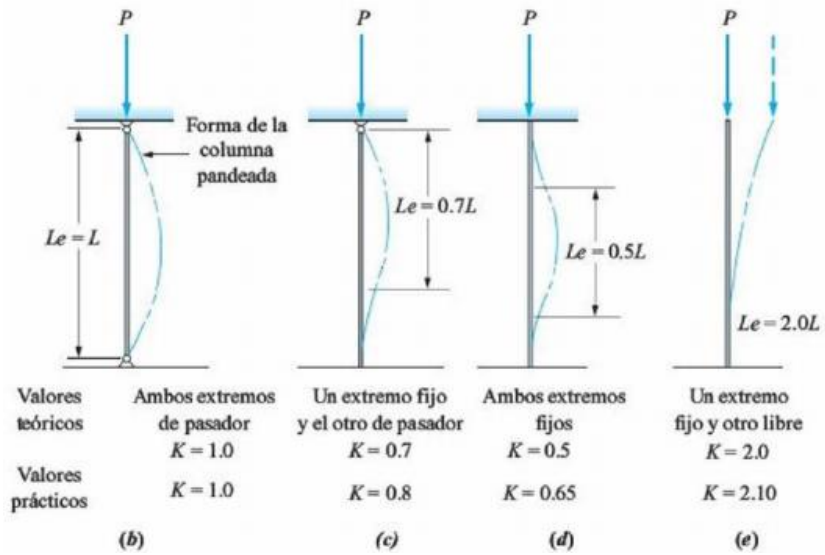
Anexo B. Valores de vt para algunos materiales poliméricos.

Fuente: Transformación de los plásticos (Waganoff, 1969).

MATERIAL POLIMÉRICO	RELACIÓN VT
Nylon	5
Polietileno	2,5
Acetato de celulosa	2,5
Cloruro de Polivinilo	2,5
Resinas metacrilicas	2,1
Poliestireno	2,5
Polipropileno	5,0

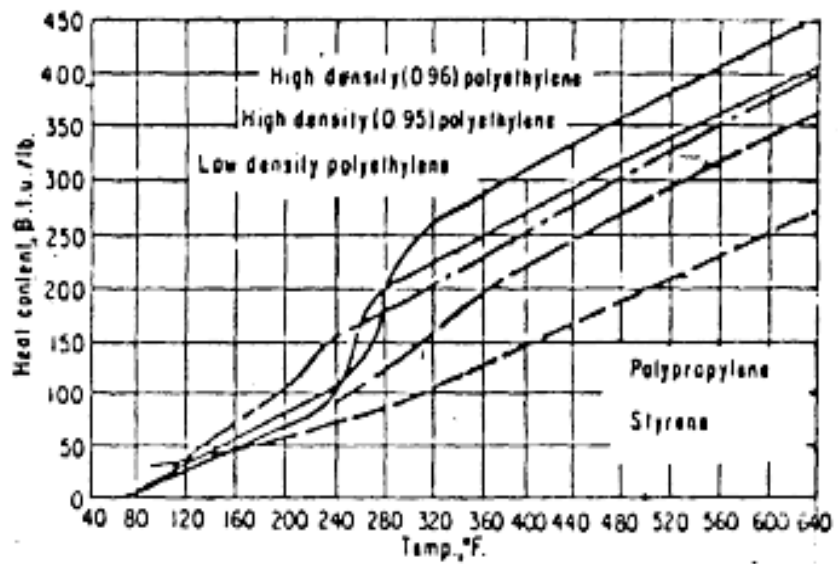
Anexo C. Valores de K para la longitud efectiva $Le=KL$, con cuatro fijaciones de extremos diferentes.

Fuente: Mott, 2008.



Anexo D. Contenido de calor por libra de polipropileno.

Fuente: Transformación de los plásticos (Waganoff, 1969).



Anexo E. Temperatura de plastificación de distintos termoplásticos.

Fuente: Transformación de los plásticos (Waganoff, 1969).

TERMOPLÁSTICOS	RANGO DE TEMPERATURA
Polietileno (baja presión)	150 – 260 °C
Polietileno (alta presión)	165 – 316 °C
Polipropileno	199 – 288 °C
Acetato de celulosa	168 – 255 °C
Poliamidas (Nylon)	265 – 277 °C
Metacelato	175 – 246 °C
Cloruro de polivinilo	176 – 215 °C

Anexo F. Composición química y propiedades mecánicas para el acero AISI 1045.

Fuente: FERROCORTES S.A.S

MATERIAL	ACERO AL CARBONO AISI/SAE 1045
COMPOSICIÓN QUÍMICA	0,43 - 0,50 %C
	0,15 -0,35 %Si
	0,60 - 0,90 %Mn
	0,04 %P máx
	0,05 %S máx
PROPIEDADES MECÁNICAS	Sy= 310 MPa
	Su= 570 MPa
	Dureza= 163 HB

Anexo G. Composición química y propiedades del acero AISI 1020.

Fuente: FERROCORTES S.A.S

MATERIAL	ACERO AL CARBONO AISI/SAE 1020
COMPOSICIÓN QUÍMICA	0,18 - 0,23 %C
	0,15 -0,35 %Si
	0,30- 0,60 %Mn
	0,04 %P máx
	0,05 %S máx
PROPIEDADES MECÁNICAS	Sy= 220 MPa
	Su= 390 MPa

	Dureza= 110 HB
--	----------------

Anexo H. Composición química y propiedades mecánicas para el acero ASTM A36.

Fuente: FERROCORTES S.A.S

MATERIAL	ACERO ESTRUCTURAL ASTM A36
COMPOSICIÓN QUÍMICA	0,25 %C
	0,40 %Si máx
	0,04 %P máx
	0,05 %S máx
PROPIEDADES MECÁNICAS	Sy= 250 MPa
	Su= 440 - 550 MPa
	Dureza= 120 – 135 HB

Anexo I. Composición química y propiedades mecánicas del acero inoxidable 304

Fuente: Cia. General de Aceros S.A.

MATERIAL	ACERO INOXIDABLE 304
COMPOSICIÓN QUÍMICA	<0,08% C
	18 – 20% Cr
	8-10,5% Ni
	0.03 %S
	<2% Mn
	<1% Si
PROPIEDADES MECÁNICAS	Sy= 205 MPa
	Rt= 515 MPa
	Dureza= 208 HB

Anexo J. Composición química y propiedades mecánicas para el acero AISI 1518.

Fuente: FERROCORTES S.A.S

MATERIAL	ACERO ALEADO AISI/SAE 1518
COMPOSICIÓN QUÍMICA	0,18 – 0,24 %C
	0,20 – 0,30 %Si máx
	0,04 %P máx
	1,10 – 1,40 %Mn
	0,05 %S máx

PROPIEDADES MECÁNICAS	Sy= 490 – 620 MPa
	Rt= 416 - 435 MPa
	Dureza= 180 - 245 HB

Anexo K. Composición química y propiedades mecánicas para el acero AIS 1035.

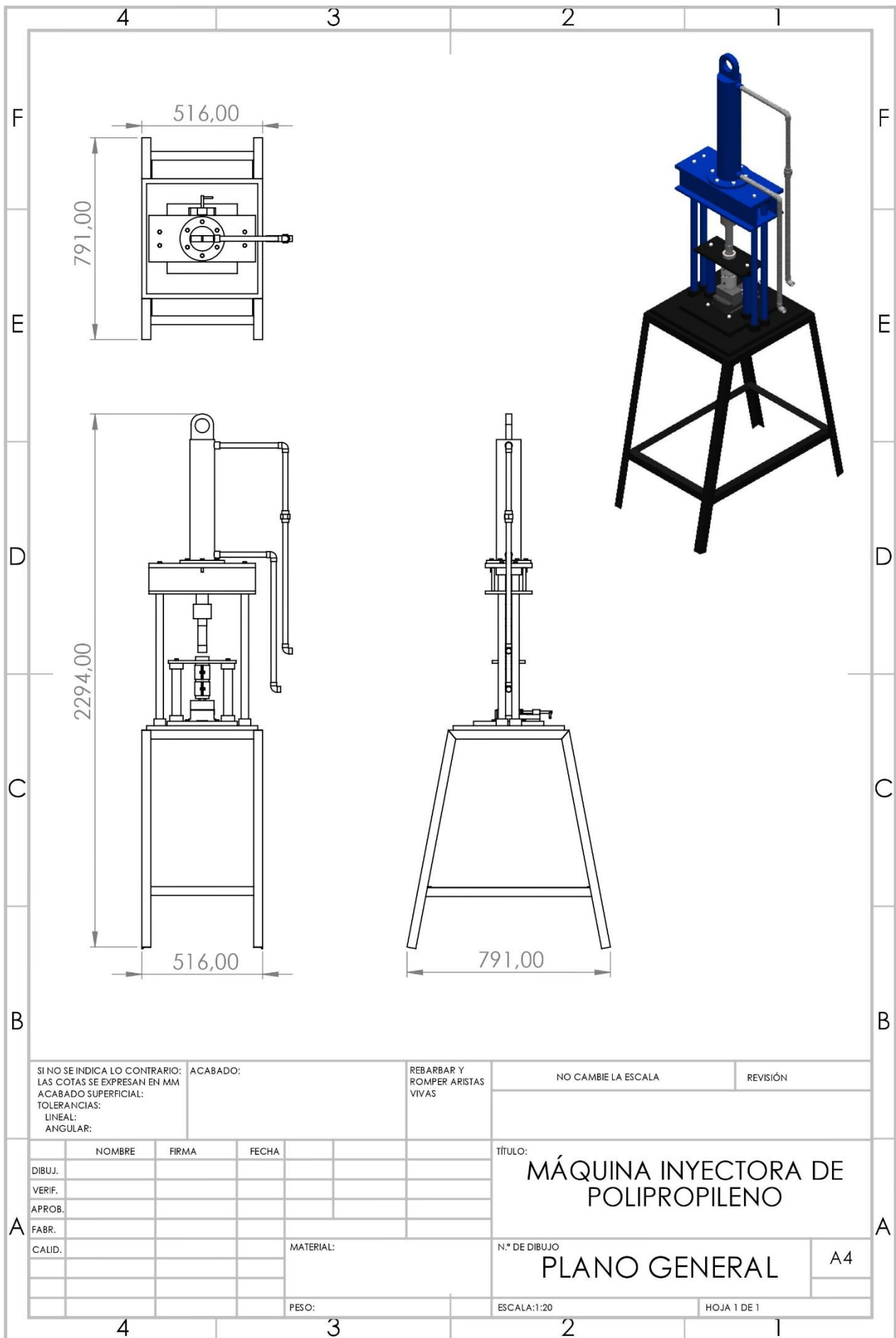
Fuente:

MATERIAL	ACERO AISI 1035
COMPOSICIÓN QUÍMICA	0,35% C
	0,29% Si
	0,5-0,8% Mn
	0,035% P
	0,035% S
PROPIEDADES MECÁNICAS	Su= 500 – 550 MPa
	Sy= 270 – 320 MPa
	Dureza= 143 – 163 HB

Anexo L. Datos de variables para determinar el tiempo mínimo de enfriamiento de algunos materiales poliméricos.

Material	Tc (°C)	Tm (°C)	Tx (HDT)(°C)	Difusividad (cm².s⁻¹)
ABS	240	60	95	1.7 x10 ⁻³
CA	210	50	98	1.04 x10 ⁻³
PA 6	260	90	180	0.98 x10 ⁻³
PA 66	285	90	180	1.01 x10 ⁻³
PC	300	90	130	1.47 x10 ⁻³
HDPE	240	20	92	0.74 x10 ⁻³
LDPE	220	20	45	1.15 x10 ⁻³
PMMA	240	50	102	1.09 x10 ⁻³
PP	240	40	107	0.85 x10 ⁻³
PS	220	20	85	1.6 x10 ⁻³
HIPS	220	20	85	1.6 x10 ⁻³
PVC Plastf.	180	20	85	1.16 x10 ⁻³

Fuente: [11]



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				

TÍTULO:
**MÁQUINA INYECTORA DE
 POLIPROPILENO**

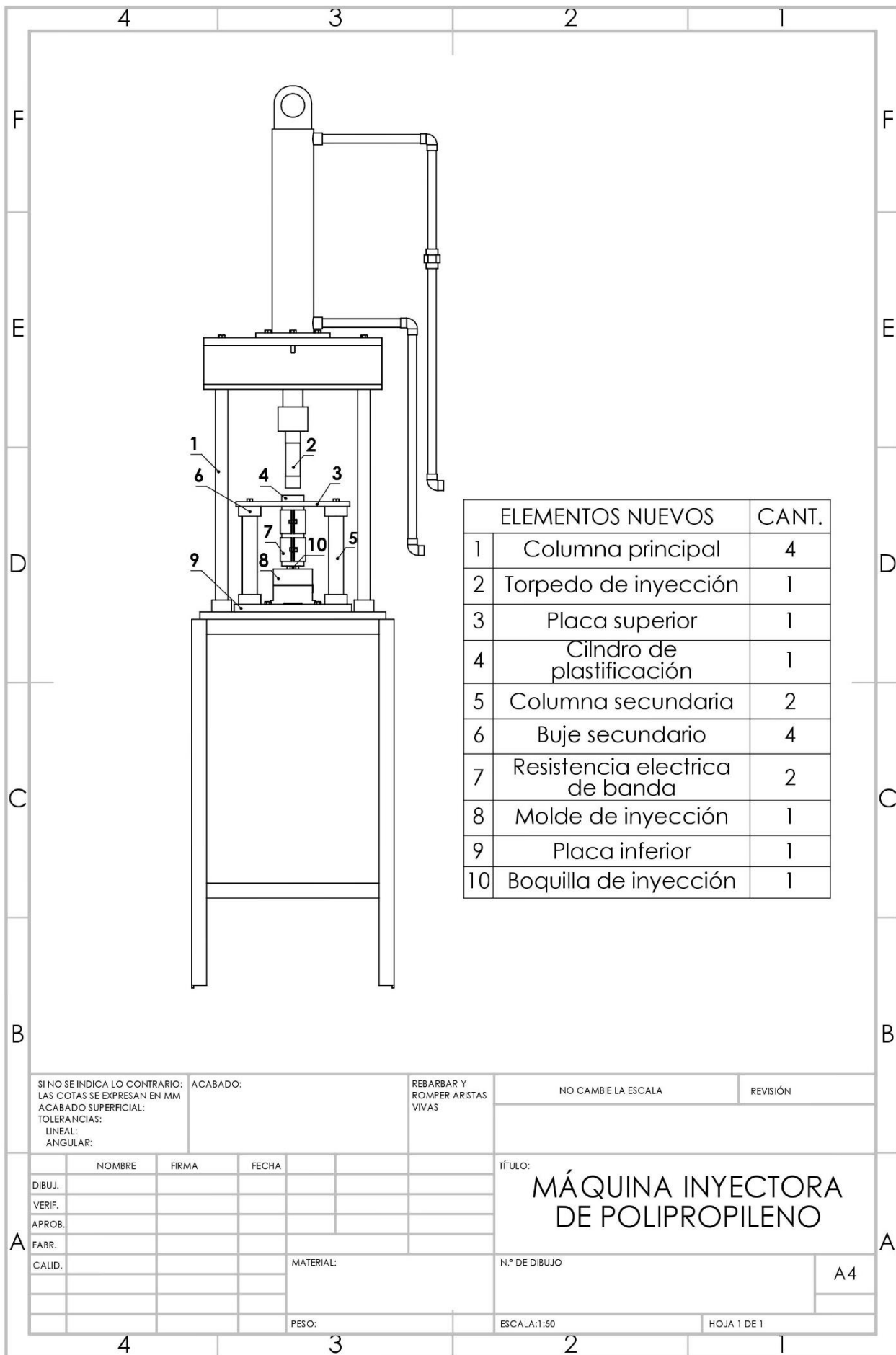
N.º DE DIBUJO
PLANO GENERAL

A4

PESO:

ESCALA: 1:20

HOJA 1 DE 1



ELEMENTOS NUEVOS		CANT.
1	Columna principal	4
2	Torpedo de inyección	1
3	Placa superior	1
4	Cilindro de plastificación	1
5	Columna secundaria	2
6	Buje secundario	4
7	Resistencia electrica de banda	2
8	Molde de inyección	1
9	Placa inferior	1
10	Boquilla de inyección	1

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:

MÁQUINA INYECTORA DE POLIPROPILENO

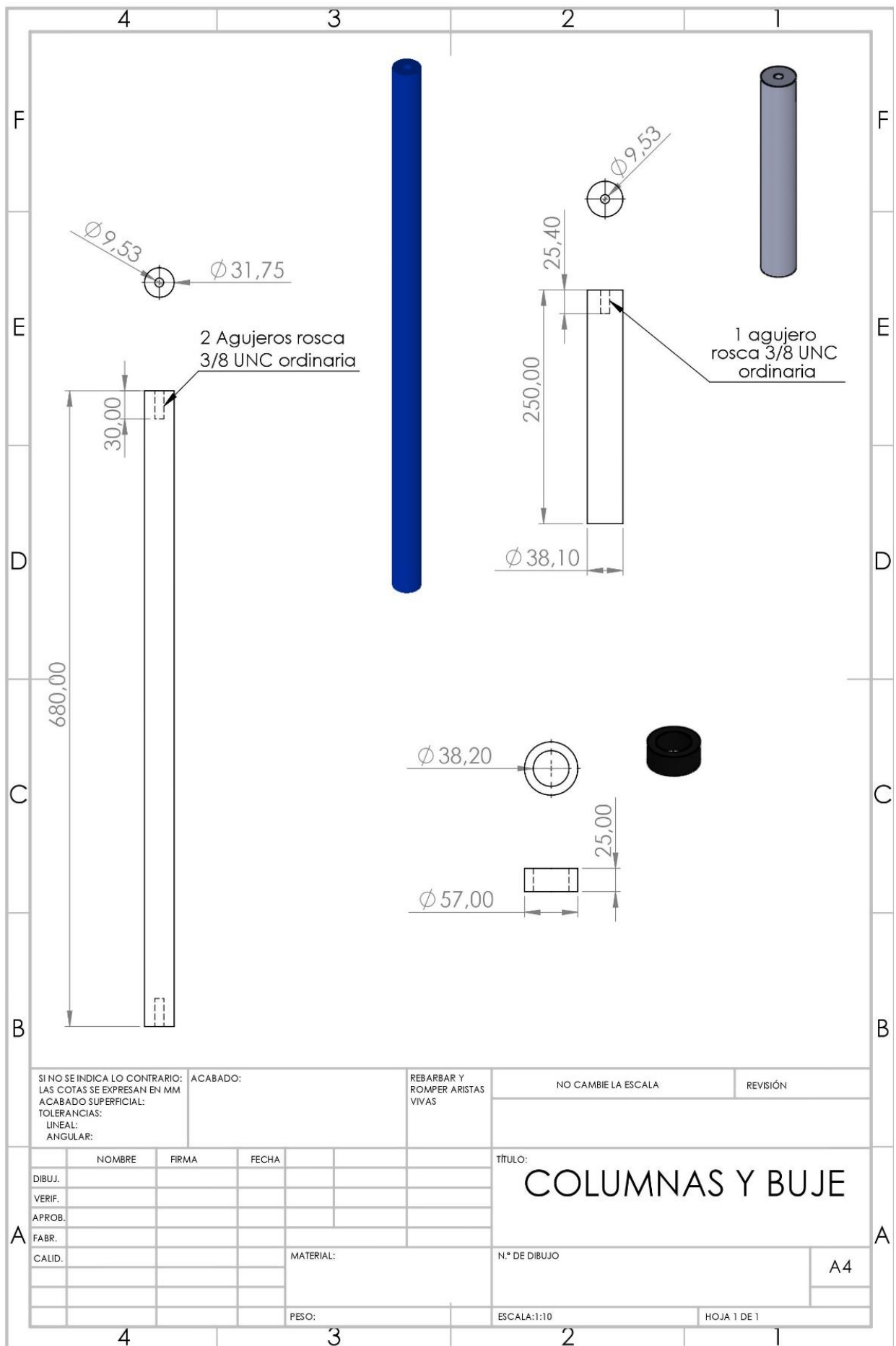
N.º DE DIBUJO

A4

PESO:

ESCALA:1:50

HOJA 1 DE 1



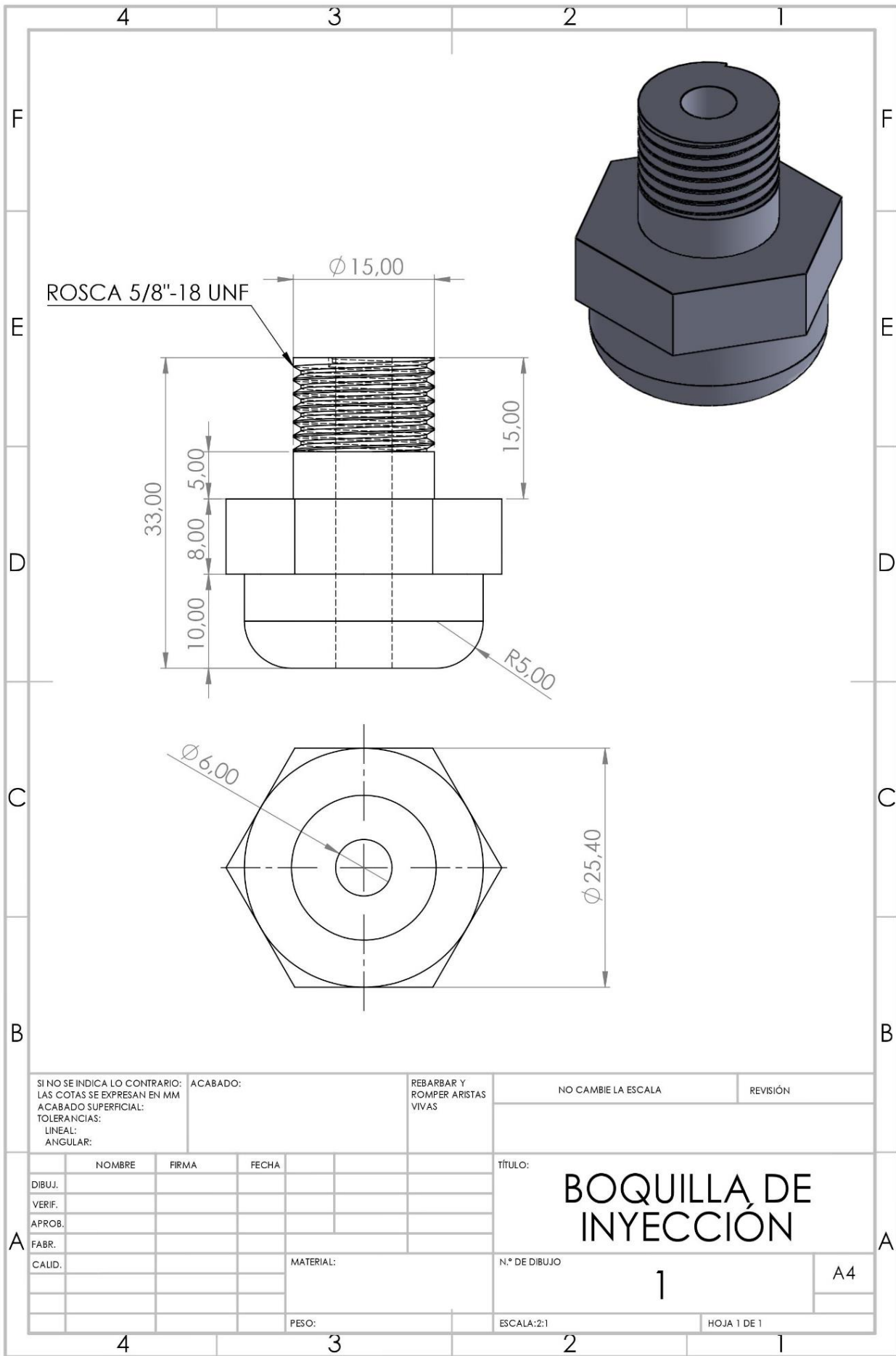
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:
 REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA
 REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:
COLUMNAS Y BUJE
 N.º DE DIBUJO
 ESCALA:1:10
 HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

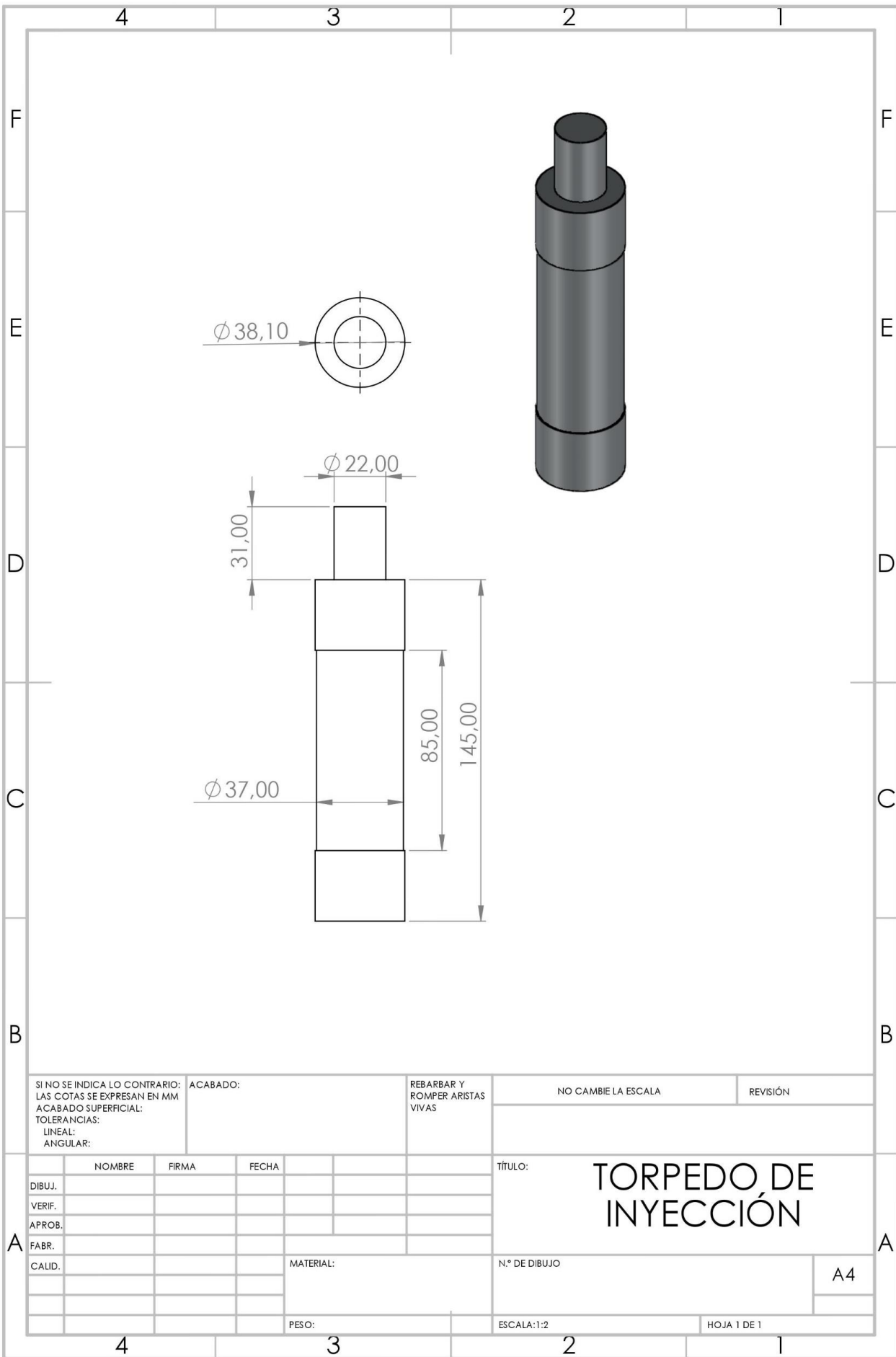
	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:
BOQUILLA DE INYECCIÓN

N.º DE DIBUJO
1

ESCALA: 2:1

HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TÍTULO: **TORPEDO DE INYECCIÓN**

N.º DE DIBUJO

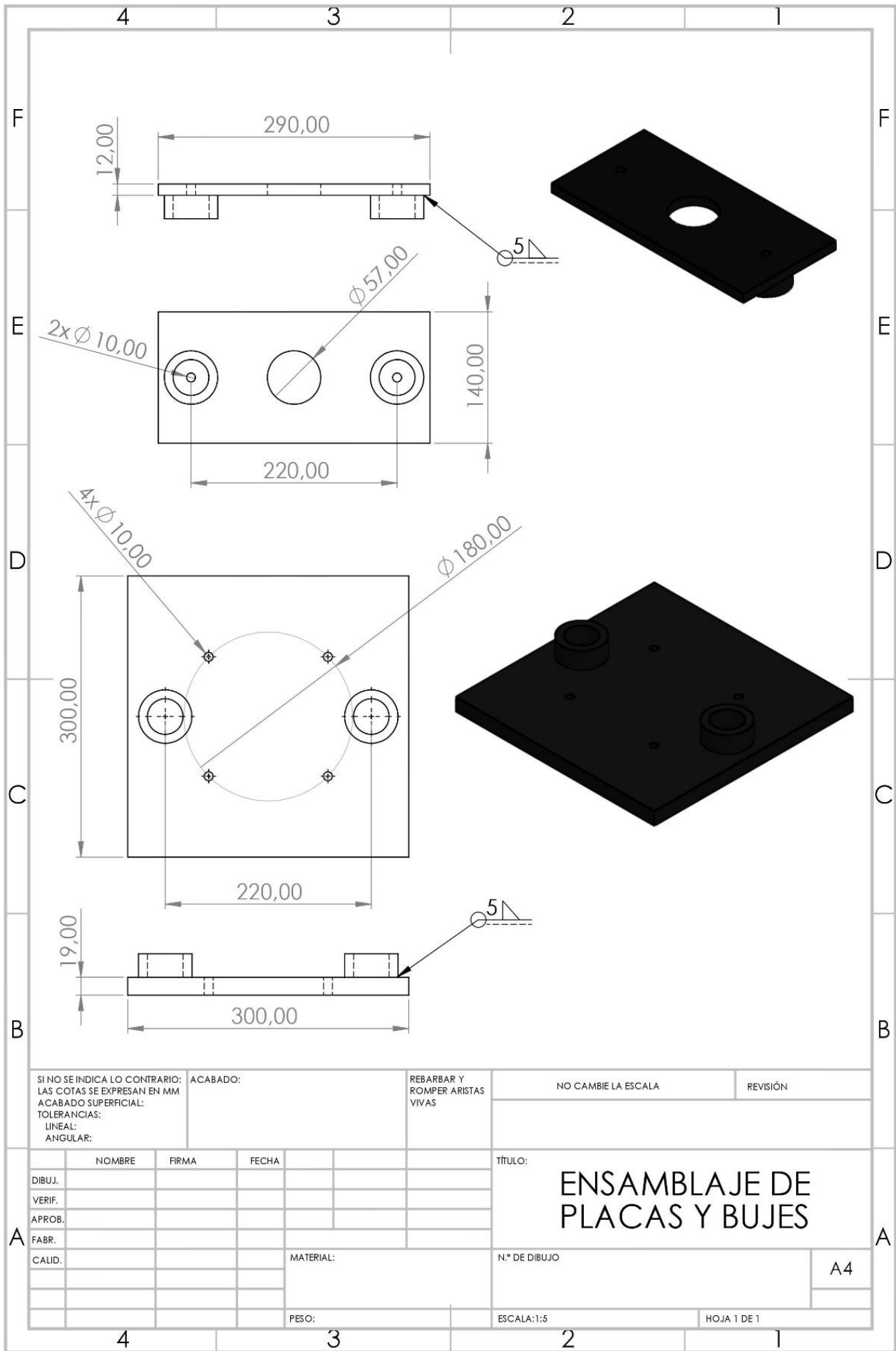
MATERIAL:

PESO:

ESCALA:1:2

HOJA 1 DE 1

A4



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

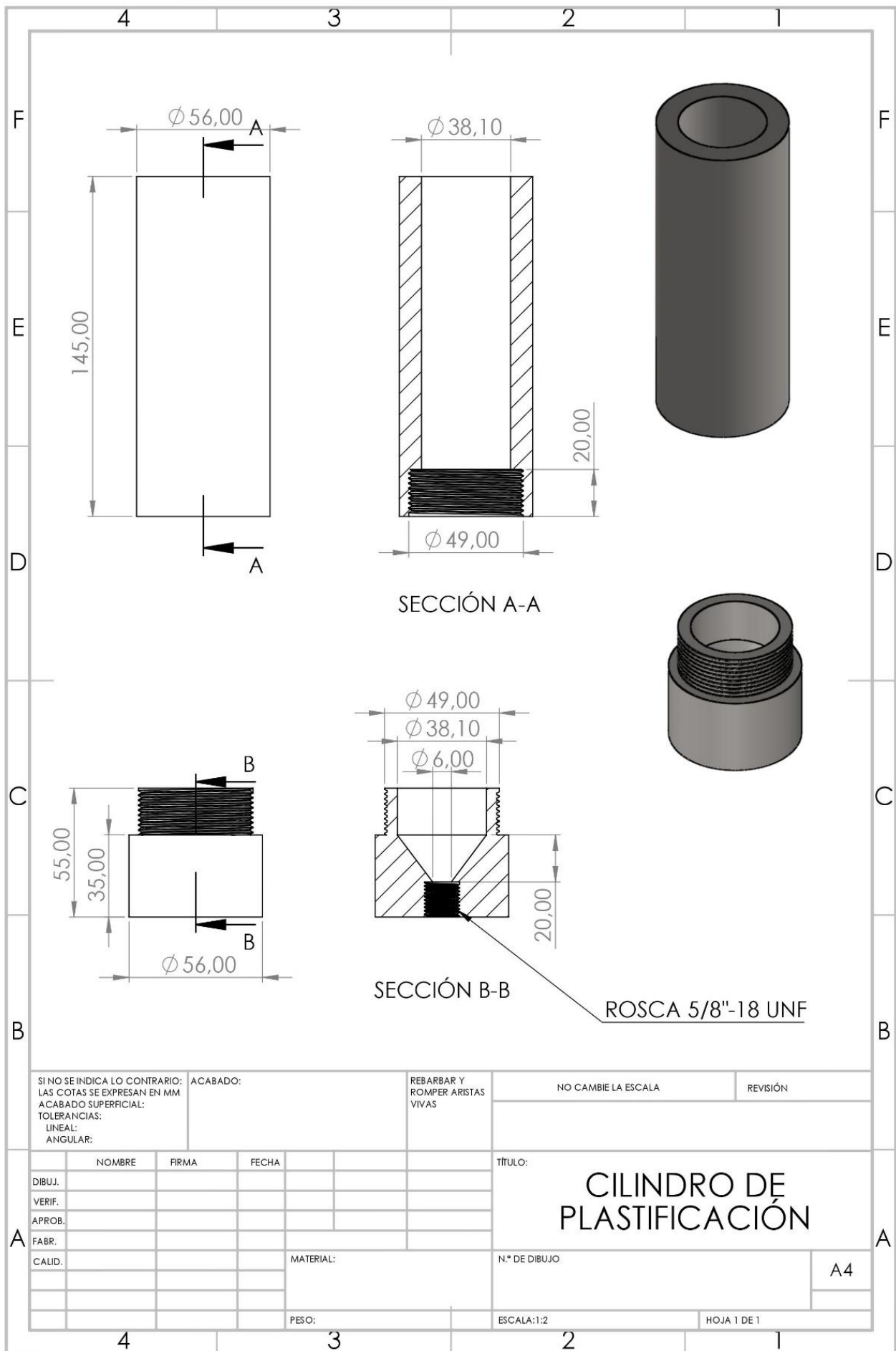
TÍTULO:
ENSAMBLAJE DE PLACAS Y BUJES

N.º DE DIBUJO

ESCALA:1:5

HOJA 1 DE 1

A4



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:			ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>NOMBRE</th> <th>FIRMA</th> <th>FECHA</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>DIBUJ.</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>VERIF.</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>APROB.</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>FABR.</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>CALID.</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>				NOMBRE	FIRMA	FECHA		DIBUJ.				VERIF.				APROB.				FABR.				CALID.				TÍTULO: CILINDRO DE PLASTIFICACIÓN		N.º DE DIBUJO A4
NOMBRE	FIRMA	FECHA																												
DIBUJ.																														
VERIF.																														
APROB.																														
FABR.																														
CALID.																														
MATERIAL:				ESCALA: 1:2	HOJA 1 DE 1																									
PESO:																														

