



Diseño de cabezal y post proceso de extrusión para colocación de revestimiento externo en prototipos de electrodos tubulares revestidos

Matías Velozo y Lucía Sabesinsky

Universidad Nacional de Rosario
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Escuela de Ingeniería Mecánica
Rosario, Argentina

2023

Diseño de cabezal y post proceso de extrusión para colocación de revestimiento externo en prototipos de electrodos tubulares revestidos

Matías Velozo y Lucía Sabesinsky

Proyecto Final de Ingeniería Mecánica presentado como requisito parcial para optar
al título de:

Ingeniero Mecánico e Ingeniera Mecánica

Director/a:

Ing. Pedro Sismondi – Ing. Guillermo Rodríguez – Ing. Juan Sismondi

Universidad Nacional de Rosario
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Escuela de Ingeniería Mecánica
Rosario, Argentina

2023

Dedicatorias

Matías Velozo

A mis padres y mis amigos que me acompañaron durante todos estos años, brindándome el apoyo y afecto que fueron imprescindibles para conseguir este objetivo.

Lucía Sabesinsky

A mí familia: mi papá, mi mamá, mi hermana y mí perra, por haberme acompañado siempre con empatía, valores y enseñanzas. Gracias por haber estado cuando más me costó, con consejos sobre su experiencia propia en el caso de mí papá, cómo ingeniero mecánico. Este gran logro no es sólo mérito mío, tuve las oportunidades que me han brindado ustedes y la suerte de haber nacido en este lugar (y momento histórico).

A la Universidad pública gratuita Argentina, y a quien tuvo la iniciativa de crearla, por haberme brindado la posibilidad de acceder a educación de excelencia a mí y a millones de Argentinos y Argentinas.

Agradecimientos

A la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG) y el Laboratorio de Robótica, Soldagem e Simulação (LRSS) de la facultad de ingeniería por aceptar y aportar la idea de realización del actual proyecto.

Resumen

La idea del presente trabajo surge a partir del Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação (LRSS) de la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Minas Gerais (UFMG), a partir de su necesidad de investigar constantemente nuevas tecnologías relacionadas con la soldadura.

La presente propuesta tiene como objetivo el estudio, investigación y diseño de un cabezal extrusor para la colocación de revestimiento externo para prototipos de electrodos de soldadura, el cual implicaría un nuevo proceso de soldadura a estudiar por el laboratorio. Además, será objeto de estudio y diseño el proceso post extrusión, teniendo en cuenta los parámetros y datos presentes durante la extrusión, para el enfriamiento del electrodo.

Se parte del hecho de la existencia de la máquina extrusora de tornillo simple, sobre la cual se diseñará el cabezal extrusor a unir mediante una conexión de bridas abulonadas, y sobre el cual se calcularán y diseñarán los diferentes canales de extrusión. Posterior al cabezal extrusor, se diseñará un sistema de enfriamiento que permita solidificar el revestimiento compuesto de una mezcla homogénea entre polvo rutilico de electrodos E6013 y Polipropileno, que proviene a una temperatura de fusión de 230°C, para poder manipularlo hacia las siguientes etapas del proceso de fabricación.

Los cálculos y diseños para el cabezal y sistema de enfriamiento serán simulados y corroborados con SolidWorks, utilizando la herramienta computacional para la confección de planos y modelado de las partes.

Palabras clave: Extrusión, Máquina extrusora, Temperatura, Cabezal de extrusión, Simulación, Polímero.

Abstract

The idea of this work arises from the Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação (LRSS) of the engineering faculty of the National University of Minas Gerais (UFMG), from its need to constantly research new technologies related to welding machines and process.

The objective of this proposal is the study, research and design of an extruder head for the covering of external coating for welding electrode prototypes, which would imply a new welding process to be studied by the laboratory. In addition, the post-extrusion process will be studied and designed, taking into account the parameters and data present during extrusion, for the cooling of the electrode.

It is based on the existence of the single screw extruder machine, on which the extruder head to be joined by a connection of bolted flanges will be designed, and on which the different extrusion channels will be calculated and designed. After the extruder head, a cooling system will be designed that allows the coating composed of a homogeneous mixture between rutile electrode powder E6013 and Polypropylene to solidify, which comes at a fusion temperature of 230°C, to be able to manipulate it towards the following stages of the fabrication process.

The calculations and designs for the head and cooling system will be simulated and corroborated with SolidWorks, using the computational tool for the preparation of plans and modeling of the parts.

Keywords: Extrusion, Extruder machine, Temperature, Extrusion head, Simulation, Polymer.

Contenido

Agradecimientos	4
Resumen.....	5
Abstract	6
Contenido	7
Introducción	11
Capítulo 1 : Fundamentos del proyecto	13
1.1 Objetivos y fundamentos	13
1.2 Variables y condiciones para el estudio	15
1.3 Alcance y propósito.....	22
Capítulo 2 : Marco teórico	25
2.1 Electrodo de soldadura macizo con revestimiento.....	25
2.1.1 Clasificación de los electrodos revestidos según su composición	27
2.2 Electrodo de soldadura tubular.....	30
2.3 Electrodo tubular revestido	34
2.4 Fabricación de electrodos convencionales en la actualidad	35
2.4.1 Máquina de recubrimiento	36
2.4.2 Mezclador.....	52
2.4.3 Horno	53
2.5 Componentes básicos y funcionamiento de una extrusora de tornillo	55
2.5.1 Tolva.....	60
2.5.2 Cilindro	61
2.5.3 Tornillo.....	62
2.5.4 Cabezal	66
2.5.5 Tipos de recubrimientos	80
2.5.6 Resistencias eléctricas	82
2.5.7 Termopares	83
2.6 Reología	84

2.6.1 Viscosidad	85
2.6.2 Esfuerzo cortante	85
2.6.3 Viscosidad efectiva.....	86
2.7 Modelos de Flujo	87
2.7.1 Fluidos Newtonianos y No Newtonianos	87
2.7.2 Ley de Potencia	88
2.7.3 Ecuaciones de caudal	91
2.8 Influencias de variables	96
2.8.1 Efecto de las dimensiones del tornillo.....	96
2.8.2 Efecto de la viscosidad del material a extruir.....	98
2.8.3 Efecto de las condiciones de operación	98
2.8.4 Efecto de la restricción de la boquilla	99
2.9 Características del material a extruir.....	99
2.9.1 Polvo de electrodo rútilico E6013	100
2.9.2 Polipropileno	101
Capítulo 3 : Marco metodológico.....	105
3.1 Análisis QFD.....	105
3.1.1 Requerimientos de usuario.....	108
3.1.2 Especificaciones técnicas.....	110
3.2 Método de diseño: análisis morfológico	118
3.2.1 Análisis funcional.....	119
3.2.2 Matriz morfológica y generación de conceptos	126
3.2.3 Método de ponderación y elección de la solución.....	137
Capítulo 4: Desarrollo de la solución adoptada.....	141
4.1 Parámetros previos al diseño.....	141
4.1.1 Datos de la máquina extrusora.....	141
4.1.2 Materiales a utilizar para el diseño de los componentes.....	156
4.2 Cabezal de extrusión	157
4.2.1 Dimensionamiento de canales de extrusión	158
4.2.2 Cálculo de factor conductividad del cabezal	167
4.2.3 Cálculo de caudal de extrusión.....	167

4.2.4 Cálculo del espesor del housing	170
4.2.5 Diseño de los componentes del cabezal	173
4.2.6 Ensamblaje final del cabezal	204
4.3 Sistema de enfriamiento	208
4.3.1 Simulaciones	215
4.4 Sistema de calentamiento	220
4.5 Pasos previos a utilizar la máquina	225
Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones	227
5.1 Conclusiones	227
5.2 Recomendaciones	228
Bibliografía	229
Anexo A: Memoria de cálculo	231
Ponderación de las soluciones	231
Diseño del cabezal	234
Plato rompedor y mallas	234
Dimensionamiento canales de extrusión	236
Parámetros del tornillo de extrusión	243
Cálculos de caudales de extrusión	245
Comparación caudales con reducción de sección en tramo cónico anular	246
Cálculo presiones del sistema	247
Cálculo espesor del cabezal	248
Cálculo de bulones para brida de unión cilindro - cabezal	249
Cálculo de tornillos para boquilla interior y tapas laterales	253
Cálculo del sistema de enfriamiento	254
Tina de enfriamiento	255
Aire a presión	256
Spray (aire + agua)	257
Cálculo de la distancia del soporte	258
Simulaciones efectuadas para comprobación de cálculos de enfriamiento	259
Cálculo del calentamiento del agua	262

Energía necesaria para mantener la temperatura en 230 °C.....	263
Energía necesaria para calentar el cabezal a 230 °C.....	265

Introducción

El tema central de este proyecto se basa en el desarrollo de electrodos tubulares revestidos que puedan ser flexibles a temperatura ambiente. De esta forma, el laboratorio tendrá la posibilidad de analizar y evaluar un nuevo tipo de procedimiento de soldadura, utilizando electrodos capaces de adaptarse a la superficie a unir, y controlando los parámetros de la soldadura a partir de una máquina específicamente diseñada para el proceso.

El proceso de soldadura en cuestión implica la generación de un arco de alta intensidad para la fusión localizada del electrodo y aporte a las piezas a soldar (SMAW), a partir de la diferencia potencial entre la masa del electrodo (alambre tubular central) y las piezas a soldar. En sí, también combina el tipo de soldadura FCAW debido a la utilización de un alambre tubular con flujo interno. Debido al carácter de confidencialidad y desarrollo por parte del laboratorio, no es posible mostrar imágenes relacionadas al proceso.

El electrodo se encuentra constituido por las siguientes partes:

Alma del electrodo: conformada en acero de bajo carbono

Revestimiento: conformada a partir de la mezcla homogénea entre polvo rútilico de electrodo (E6013) y polímero (polipropileno)

Flujo interno: el mismo se encuentra alojado en el interior del alma del electrodo, conformado por una mezcla entre polímero, polvo de hierro, polvo de dióxido de manganeso, entre los principales.

Como antecedentes, es posible encontrar referencias de estudios realizados por la UFMG en donde se estudió la confección de diferentes tipos de electrodos tubulares y elementos constituyentes, principalmente para el desarrollo de la soldadura subacuática. [9] [10] [11]

En el proceso, el electrodo se colocaría situado en contacto sobre las superficies a unir, a lo largo de donde se ubicaría el cordón de soldadura deseado, describiendo la trayectoria del mismo sobre las partes implicadas. Posteriormente, el soldador realizaría la soldadura mediante el movimiento a una velocidad constante de la punta de una máquina de soldadura (diseñada especialmente para el proceso en cuestión) en contacto directo con el alma del electrodo, otorgando una carga eléctrica sobre el mismo y que, debido a la diferencia de potencial existente con la pieza a soldar (con

una carga eléctrica opuesta a la del electrodo), genera el arco eléctrico que realiza la fundición localizada del electrodo y la pieza y, por consiguiente, el aporte que permite unir las partes (fundamento básico de una soldadura convencional SMAW). Esto implicaría una ventaja al momento de realizar una soldadura sobre superficies irregulares y con grandes longitudes, facilitando la operación, teniendo sólo que realizar el movimiento constante de la punta de la máquina de soldadura a lo largo del electrodo para ir generando el arco eléctrico (pudiendo regular la velocidad del proceso con la velocidad de movimiento) y por lo tanto, la fundición para realizar la unión continua sobre las partes implicadas, además de ir generando, mediante el flujo interno del electrodo tubular y el revestimiento externo, la atmósfera y condiciones necesarias para un correcto proceso de soldadura.

En base al deseo de estudio de este nuevo proceso de soldadura, se desea estudiar, desarrollar y diseñar un prototipo de cabezal de extrusión para la colocación del revestimiento externo del electrodo, y su posterior enfriamiento, para poder formar las bases principales para la producción a escala de laboratorio de los electrodos de soldadura.

Esta invención provocará un avance en el proceso de fabricación de los electrodos, para poder estudiar parámetros de soldadura en el nuevo proceso desarrollado por el laboratorio de soldadura de la UFMG.

Capítulo 1 : Fundamentos del proyecto

En el primer capítulo del proyecto, se dispondrán las bases y análisis realizados para comenzar con el desarrollo del mismo.

La idea surge a partir del *Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação (LRSS) de la facultad de ingeniería de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG)*, ubicada en la ciudad de Belo Horizonte, Brasil.

En principio, se desea desarrollar en el laboratorio prototipos de electrodos de soldadura, con la condición de que los mismos sean electrodos tubulares revestidos y posean la característica de ser flexibles a temperatura ambiente.

1.1 Objetivos y fundamentos

Los objetivos para este proyecto se establecen desde el diseño, compresión y estudio de un cabezal extrusor para poder colocar el revestimiento al alma del electrodo ya previamente conformada, seguido de la definición de un sistema de enfriamiento post extrusión para así lograr un electrodo manipulable y con las condiciones físicas necesarias para su estudio en el laboratorio.

Los mismos pueden enumerarse como sigue:

Tabla 1-1: Objetivos del proyecto.

OBJETIVOS	
Número	Descripción
1	Estudiar y diseñar un cabezal de extrusión para una máquina extrusora de tornillo, que permita:
1.1	Extruir el revestimiento sobre el alma del electrodo en forma uniforme y continua, según los requerimientos impuestos.
1.2	Mantener las condiciones físicas necesarias para la extrusión del revestimiento (temperatura, presión) en el cabezal.
1.3	Soportar los esfuerzos y cargas impuestos por el flujo en cuestión (presión, abrasión, desgaste, temperatura)

1.4	Presentar la capacidad de regular la apertura de la salida de extrusión, para ajustarla según el caudal de extrusión.
1.5	Asegurar la forma geométrica de extrusión deseada durante todo el proceso
2	Estudiar y especificar el post proceso de extrusión, que permita:
2.1	Enfriar laminarmente el electrodo que sale del proceso de extrusión para solidificar el revestimiento y permitir la maniobrabilidad del mismo
2.2	Almacenar el electrodo en longitudes definidas para permitir su posterior traslado.
3	Estudiar el proceso de extrusión para poder dimensionar los elementos intervinientes
4	Procurar que los sistemas y elementos diseñados sean capaces de fabricarse con procesos convencionales de fabricación y/o elementos normalizados
5	Realizar planos de especificación y detalle de los componentes y sistemas diseñados

Esta serie de objetivos tiene como fundamentos poder lograr fabricar un electrodo, **a escala de laboratorio**, que permita las siguientes ventajas y aportes al proceso de soldadura convencional:

1. Electrodo que ofrezcan mejores características al proceso de soldadura convencional (SMAW), a partir de la adición de un flujo interno, el cual genera, junto con el revestimiento, condiciones de mejora para la soldadura.
2. Electrodo con diferentes largos y diámetros, adaptables a las diferentes situaciones de soldadura (características de las piezas a soldar)
3. Capacidad de generar electrodos flexibles, que se adapten a las formas y siluetas irregulares de las piezas a soldar. De este modo, se coloca el electrodo sujetado sobre el canal que se quiere soldar y se realiza el procedimiento de soldadura, facilitando el proceso de posicionamiento del soldador.
4. La capacidad de flexibilidad otorga la posibilidad de almacenar el electrodo de diferentes formas, facilitando el almacenado y transporte en caso de ser necesario.

5. Permite un proceso de soldadura continua y a velocidad y parámetros constantes

1.2 Variables y condiciones para el estudio

Para poder comenzar el estudio y diseño de los sistemas a cumplir con los objetivos planteados, primeramente, se realiza un estudio previo de las variables y condiciones límites para definir parámetros básicos de los mismos.

Como variables intervinientes en el proceso, se pueden encontrar:

Tabla 1-2: Variables del proyecto.

VARIABLES:		
Número	Nombre de la Variable	Descripción
Variables para cabezal de extrusión		
1	Materiales del cabezal de extrusión	El material de los elementos que componen al cabezal, deben tener la capacidad de soportar los esfuerzos y características físicas impuestas por el flujo (presión, temperatura, abrasión, desgaste). Deberá ser un acero al carbono aleado (generalmente con 15-18% Cromo para la resistencia a la corrosión) que soporte las temperaturas del proceso (200-300°C), las presiones, las tensiones y que permita ser tratado superficialmente para endurecimiento de su superficie (ej: nitrurado)(posibilidad: SAE 4140 con tt)
2	Terminación superficial de los conductos del cabezal de extrusión	La terminación superficial de las regiones interiores del cabezal deben estar pulidas para lograr el menor esfuerzo de rozamiento posible y así mejorar el acabado superficial del producto obtenido.
3	Geometría interna del cabezal	Las diferentes zonas que componen al cabezal de extrusión afectarán al comportamiento de la masa de extrusión. El ángulo de entrada de la mezcla al cabezal debe ser el menor posible (como máximo 30°), así como la longitud final de la boquilla de extrusión debe ser la adecuada

		(generalmente se toma 1 diámetro de extrusión como mínimo de largo de boquilla) para que la extrusión sea de buena calidad. Grandes ángulos de entrada pueden provocar distorsiones en las características físicas de la mezcla y extruir con superficies rugosas. La geometría está relacionada con la velocidad de cizalla y la caída de presión.
4	Temperatura y Presión de la mezcla	La temperatura y presión de la mezcla debe mantenerse lo más uniforme posible al ingresar al cabezal de extrusión. De esta manera se evitan cambios bruscos en la viscosidad. La temperatura de la mezcla debe mantenerse en el rango de fusión (230-240°C) y la presión no debe exceder el máximo admisible (a calcular). Se pueden colocar elementos de calentamiento en el cabezal para mantener la temperatura constante.
5	Tiempo de residencia de la mezcla	Es el tiempo medio de una partícula de fluido en recorrer todo el cabezal de extrusión. El mismo no debe ser excesivo debido a que puede provocarse la degradación del material debido a las condiciones de extrusión en el cabezal además de generar flujos contrarios que afectan al caudal. Un buen diseño del mandril del cabezal evita las <i>zonas de estancamiento</i> de la masa fundida, evitando largos tiempos de residencia.
6	Espesor del cabezal	El espesor del cabezal es clave para que el cabezal soporte las presiones máximas generadas durante el proceso, además de las temperaturas de la mezcla (230 – 240°C)
7	Forma del cabezal	Dentro de las formas posibles de los cabezales de extrusión (dirección de flujo paralelo, angular o 90° hasta la extrusión), el mismo debe tener la capacidad de poder ingresar el alma del electrodo en el sentido de dirección del flujo previo a la extrusión. Para extrusión de recubrimientos, se utiliza un cabezal con un ángulo de entre 30° y 90° con respecto al flujo de salida del tornillo para poder ingresar el alma del electrodo al cabezal en el sentido y dirección del flujo. El más utilizado es el cabezal a 90°, permitiendo el ingreso del flujo al cabezal

		perpendicularmente al ingreso del alma del electrodo.
8	Plato rompedor	El plato rompedor se encuentra ubicado en el cabezal de extrusión y permite el rompimiento del flujo helicoidal proveniente del cilindro y generar un flujo laminar, además de filtrar posibles contaminantes externos. Su diseño debe ser el correspondiente para no generar una gran caída de presión entre el cilindro y el cabezal. Además, posee las mallas filtrantes según norma.
9	Regulaciones de la boquilla	La regulación de la apertura de la boquilla permite ajustar el caudal de salida, realizando variaciones de caída de presión del cabezal para ajustarse a los cambios de temperatura y presión (y viscosidad) que pueda poseer la mezcla en el proceso, para mantener el caudal constante. Además, se ajusta el espesor de recubrimiento.
10	Presión en el cabezal de extrusión	La presión existente en la zona del cabezal de extrusión está relacionada con la caída de presión existente a lo largo del mismo. Con presiones excesivas, se puede generar un aumento del flujo de retroceso, generando flujos en dirección opuesta a la de extrusión y disminuyendo gravemente el caudal extruido. Poseer regulaciones en la boquilla permite ajustar estos parámetros de caída de presión.
11	Caída de Presión	La caída de presión es inevitable, y determina el largo de la boquilla de extrusión y el espesor de la capa extruida. Para diferentes geometrías que componen al cabezal (cilíndrica, anular, rectangular, etc) se pueden calcular las caídas de presión según un comportamiento termoplástico del material extruido. La máxima caída de presión en el cabezal se puede calcular a partir del máximo esfuerzo de cizalla y la presión de fusión del polímero.
12	Diseño del mandril y zonas de transporte anular de la mezcla en el cabezal	En el diseño del mandril (en el centro del cabezal), se debe tener consideración en:

		- La división de la mezcla al ingresar al cabezal en un conducto anular - La zona de soporte del mandril (mediante soportes “araña” o plato perforado) - La “zona de relajación” de la mezcla, ocurrente al atravesar el flujo la zona de soporte. El flujo debe ser uniforme y no estancarse. El diámetro de esta zona se sitúa entre 5 y 7 D, y la longitud 2,5 D. (D = diámetro de extrusión) - La zona de la boquilla, donde el largo y dimensiones de la misma deben ser adecuadas para asegurar la correcta presión de colocación de la mezcla.
13	Característica del cabezal extrusor	Las geometrías y formas que componen al cabezal extrusor determinan su factor K, que es utilizado para calcular el caudal real de extrusión que sale por el dado. El caudal de salida real está relacionado con: - Caída de presión - Factor del cabezal (K) - Viscosidad aparente de la mezcla
Variables para proceso de enfriamiento		
14	Tipo de enfriamiento	El enfriamiento puede ser por agua (con lluvia de agua laminar o tina de agua para sumergir) o con aire (chorro diametral de aire frío) dentro de los métodos más utilizados.
15	Coefficiente de transferencia de calor por convección h	Uno de los mecanismos de transferencia de calor por el cual el electrodo pierde energía hacia el medio es en forma de calor. Para ello, será útil conocer el coeficiente h - h aire (natural): 5 – 25 [W/m²K] - h aire (forzado): 100 – 200 [W/m²K] - h agua (natural): 20 – 100 [W/m²K] - h agua (forzado): 300 – 6000 [W/m²K]

16	Velocidad de avance del electrodo	La velocidad con la que el electrodo avanzará una vez que salga del cabezal extrusor afectará directamente en la cantidad de elementos o longitud de sistema de enfriamiento.
Variables para el proceso de almacenado		
17	Tipo de sistema	La unidad de tiro y almacenamiento debe estar coordinada con la velocidad de entrada del alma del electrodo al cabezal, lo cual establecerá una velocidad de avance del electrodo a lo largo del sistema. Se aproxima una velocidad lineal de extrusión de entre 0,05 a 0,1 m/s.
18	Forma de sujeción del electrodo	La forma y fuerza de agarre para el tiro y enrollado debe ser tal que no deforme el electrodo

Por su parte, dentro de las condiciones límites en los procesos a estudiar, se puede encontrar:

Tabla 1-3: Condiciones límites del proyecto.

CONDICIONES LÍMITES		
Número	Nombre de la CL	Descripción
1	Alcance de diseño de sistemas	Sólo serán objetivos de alcance del proyecto el estudio, diseño y especificación de los siguientes sistemas: - Cabezal de extrusión para máquina extrusora de tornillo - Sistema de enfriamiento del electrodo luego del proceso de extrusión No serán objeto de estudio demás sistemas previos o posteriores en el proceso de fabricación del electrodo, como el conformado del alma del electrodo y la máquina extrusora.

2	Estudio de la reología de la mezcla de extrusión	El estudio e investigación de la mezcla de extrusión, compuesta por polvo rutílico para electrodos E6013, polipropileno y solvente (aglomerante), así como sus características físicas y formulaciones, no será parte de los objetivos de estudio de este proyecto. Se estimarán los valores aproximando los mismos mediante las características del Polipropileno como polímero a utilizar debido a sus características.
3	Caudal de extrusión	El caudal de la máquina extrusora se encuentra entre 10 y 15 Kg/h. Para el caudal máximo caudal de extrusión (15 Kg/h), la velocidad lineal de extrusión se encontrará aproximadamente en 0,05 m/s. De esta manera, se obtiene una extrusión de 1 metro de electrodo en 18 segundos.
4	Temperatura del proceso de extrusión	Para asegurar la correcta fusión de la mezcla la misma debe encontrarse a una temperatura entre 230 °C – 240°C. Se considera que la mezcla homogénea llega al cabezal de extrusión con temperaturas en ese rango.
5	Velocidad lineal de ingreso del alma del electrodo	Para que la extrusión sea uniforme, la velocidad de entrada del alma del electrodo al cabezal debe tener la misma velocidad lineal que la del plástico extruido por el cabezal. Para caudales menores, deberá regularse la velocidad del alma correspondientemente. De esta manera, se obtiene una extrusión de calidad y asegurando una correcta colocación y uniformidad del revestimiento a lo largo del alma del electrodo.
6	Diámetro del electrodo	El electrodo se conformará en diámetros de 10 mm.
7	Diámetro del alma del electrodo	El diámetro del alma del electrodo a ingresar al proceso de extrusión es de 5 mm, y está conformado por acero de bajo carbono (SAE 1006) de espesor 1 mm.
8	Condiciones geométricas finales del electrodo	El revestimiento del electrodo debe poseer una cilindridad y concentricidad con respecto al

		alma del electrodo de $\pm 0,5$ mm para encontrarse en condiciones de buena calidad.
9	Densidad de la mezcla homogénea	La densidad de la mezcla homogénea entre polímero (polipropileno) y polvo rútilico E6013 es $1,13 \text{ g/cm}^3$ a temperatura ambiente. Para la temperatura de extrusión ($230\text{-}240^\circ\text{C}$), la densidad aparente se toma en $0,7 \text{ g/cm}^3$, según datos para el polímero a utilizar (polipropileno)
10	Velocidad de cizalla y viscosidad efectiva	La velocidad de cizalla para procesos de extrusión en general se encuentra entre 10^2 y $10^3 \text{ [s}^{-1}\text{]}$. De esta manera, para diferentes fluidos, se puede normalizar la velocidad de corte para obtener un comportamiento lo más cercano posible a un fluido newtoniano. Se determina una velocidad de cizalla de $10^2 \text{ [s}^{-1}\text{]}$ para este proceso. De esta manera, y para una temperatura de proceso de más de 200°C, se extrapola una viscosidad efectiva de la mezcla en 700 Pa.s, según tablas de reología para el Polipropileno.
11	Parámetros geométricos del tornillo extrusor	El tornillo extrusor posee las siguientes características, basadas en máquinas reales y para el caudal propuesto: - Diámetro 30 mm - Relación $L/D = 25$ - Relación de compresión (profundidad zona dosificación / profundidad zona alimentación) de 3 - Ángulo de filete: $17,65^\circ$ - Longitudes de alimentación, compresión y dosificación de $8D$, $7D$ y $5D$ respectivamente, siendo D el diámetro del tornillo (utilización para fines generales)
12	Calentamiento del alma del electrodo	Previo a ingresar al cabezal extrusor, el alma del electrodo debe ser calentada para lograr la correcta adherencia del flujo de revestimiento. La temperatura se establece en 80°C aproximadamente.

13	Valores para la ley de potencia	La ley de potencia se utiliza para modelizar la representación Velocidad de cizalla vs Viscosidad aparente del fluido fundido. Para el Polipropileno, se toman los siguientes valores: - $m = 7,5 \times 10^3$ [Pa.s] - $n = 0,38$
14	Norma ASTM E11	La norma se utiliza para un análisis granulométrico de las partículas de material, y se puede utilizar para la selección de la malla filtrante que se coloca previo al plato rompedor.
15	Conductividad térmica y calor específico de la masa fundida	Se tomarán los valores del Polipropileno: - Calor específico: 1,93 KJ/Kg°C - Conductividad térmica: 0,22 W/km
16	Tipo de enfriamiento	Se considera que para este caso el tipo de enfriamiento se limita a realizarse por aire o por agua.
17	Transferencia de calor	La transferencia de calor de la masa fundida con el medio refrigerante se da por convección, despreciando la transferencia por radiación.
18	Temperatura de solidificación	La temperatura de fusión del Polipropileno es de 160°C aproximadamente. Se considera que para poder maniobrar y posteriormente almacenar el electrodo, debe enfriarse a una temperatura menor que 160°C.

Una vez definidas las condiciones límites para el proyecto, pueden definirse los alcances y propósitos de los sistemas a diseñar.

1.3 Alcance y propósito

Como alcance del proyecto, se pueden establecer los siguientes puntos:

1. Diseñar un cabezal de extrusión que permita asegurar la colocación del revestimiento fundido, manteniendo las características físicas durante el proceso y otorgando las condiciones geométricas necesarias según requerimientos del usuario.

2. Diseñar el sistema de enfriamiento para asegurar la condición de maleabilidad para los procesos posteriores

Para estos alcances, los propósitos de los diseños a realizar en búsqueda de una solución factible deben cumplir con:

Tabla 1-4: Propósitos del proyecto.

N°	Propósito
1	Extruir la mezcla de revestimiento proveniente de la extrusora sobre el alma del electrodo.
2	Asegurar un caudal de extrusión constante a partir de regulaciones en la caída de presión en el cabezal de extrusión.
3	Asegurar el correcto ingreso y distribución de la mezcla dentro del cabezal de extrusión.
4	Mantener centrado el alma del electrodo respecto de la boquilla de extrusión.
5	Mantener a temperatura de extrusión la mezcla de revestimiento durante el proceso (230°C-240°C).
6	Posibilidad de extruir diferentes diámetros de revestimiento.
7	Asegurar que los requerimientos geométricos del electrodo sean los solicitados luego de los procesos
8	Enfriar el revestimiento extruido por debajo de su punto de fusión para poder manipularlo
9	Traccionar el electrodo hacia el sistema de almacenamiento sin dañar su estructura geométrica y dimensional.
10	Asegurar que las condiciones físicas durante el proceso de extrusión se mantengan por debajo de los requerimientos máximos (velocidad de cizalla, esfuerzos de corte en el cabezal)

Para el desarrollo del proyecto, se adoptarán metodologías e información de desarrollo de proyectos planteada por Ullman [2].

En los posteriores capítulos, se comenzará con un desarrollo del marco teórico para poner en conocimiento los recursos e informaciones correspondientes a los procesos de extrusión y soldadura, seguido de un marco metodológico que consta de un desarrollo por etapas para encontrar la solución adecuada, y por último, el capítulo destinado la explicación de los resultados obtenidos para el diseño de la solución encontrada.

Capítulo 2 : Marco teórico

2.1 Electrodo de soldadura macizos con revestimiento

El **electrodo** es una varilla metálica que se funde durante el proceso de soldadura y se solidifica sobre el metal base, aportando el metal suficiente para realizar la unión. Este aporte debe tener propiedades similares a las del metal base o mejores, con el fin de conseguir una soldadura homogénea.

La varilla, llamada núcleo o alma, en los procesos convencionales de soldadura SMAW, está recubierta de una envoltura llamada revestimiento. La única parte del electrodo en donde el núcleo queda al descubierto (sin recubrimiento) se da en la punta del mismo, de modo que en esa parte se desarrolle la conducción del arco eléctrico al colocar la pinza portaelectrodos (masa), y comience posteriormente en la punta opuesta del electrodo, el arco eléctrico que genere la fusión del mismo para realizar el aporte de soldadura en el material deseado. El núcleo generalmente se realiza de acero de bajo contenido de carbono (0,10 % C como máximo).

El **revestimiento** del electrodo por su parte, es la parte que reviste el núcleo del electrodo. Los elementos más comúnmente usados en los revestimientos son: celulosa, sales de potasio, silicatos de aluminio y de manganeso, ferro manganeso, titanio y rutilo, polvo de hierro y óxido de hierro, entre los principales, y todos los elementos se encuentran aglomerados mediante silicatos de sodio y potasio o por compuestos orgánicos. Estos funden al mismo tiempo que el núcleo y tiene como principal objetivo mejorar las propiedades metalúrgicas y la calidad del cordón de soldadura.

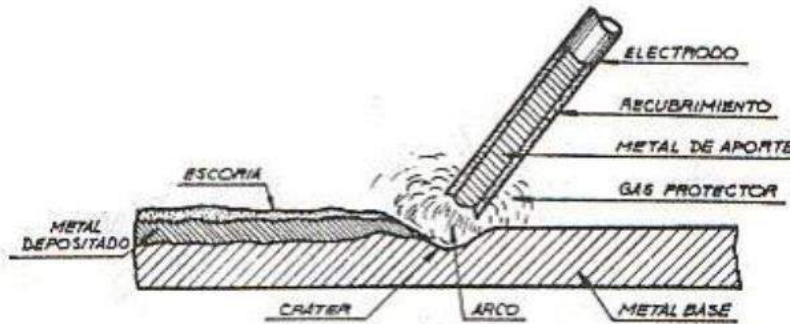


Figura 2-1: Esquema de soldadura con electrodos revestidos.

Las funciones principales del revestimiento del electrodo a la hora de realizar un cordón de soldadura pueden ser divididos en:

- **Función Eléctrica:** Dentro de las principales funciones, se menciona como principal característica mejorar el cebado del arco. Para ello al revestimiento se le adicionan silicatos, carbonatos y óxidos de Fe y Ti que favorecen la generación del arco eléctrico. Además, otra de las principales características es la estabilización del arco. Esto es ya que, una vez originado el arco eléctrico, es necesario su estabilización para controlar el proceso de soldadura y garantizar un cordón con buenas propiedades. Para esto, en la composición del revestimiento se debe poseer iones positivos durante el proceso. Esto se consigue añadiendo a la composición sales de sodio y potasio, que además cumplen la función de aglomerar los diferentes componentes que forman parte del electrodo, como anteriormente se mencionó.
- **Función física:** Dentro de las funciones físicas, podemos mencionar como principal la creación de un gas de protección para la soldadura. Esta función protectora se consigue mediante la formación de un gas protector que elimina el aire circundante y los elementos nocivos para el proceso, como son el oxígeno presente en la atmósfera (que produce óxidos del metal), el nitrógeno (que da dureza y fragilidad al cordón) o el hidrógeno (que introduce más fragilidad a la unión). Además, permite la formación de escorias. La formación de escoria en el cordón permite disminuir la velocidad de enfriamiento del baño, mejorando las propiedades mecánicas y metalúrgicas del cordón resultante. Esto se consigue a partir de que la escoria se encuentre “flotando” en la superficie del baño, quedando atrapada en su superficie. También, permite la concentración del arco, lo cual permite una mejor eficiencia en la soldadura y disminuir las pérdidas de energía. Este fenómeno se consigue debido a que el alma metálica del electrodo se consume más rápidamente que

el revestimiento, originándose así una especie de cráter en la punta que sirve para concentrar la salida del arco. Por último, la presencia del revestimiento permite al operador soldar en diferentes posiciones, dando la posibilidad de versatilidad en la soldadura. El recubrimiento actúa como limpiador y desoxidante del material base durante la soldadura, dando también forma al cordón realizado.

- **Función Metalúrgica:** Mediante el revestimiento se permite reducir la velocidad de enfriamiento. Ello se consigue porque las escorias producidas quedan flotando en el baño de fusión y forman una capa protectora del cordón, que además sirve de aislamiento térmico que reduce su velocidad de enfriamiento. Además, también tiene la función de mejorar las características mecánicas, a partir del empleo de los diferentes componentes que forman parte en el proceso.

2.1.1 Clasificación de los electrodos revestidos según su composición

Dentro de la clasificación de los electrodos, podemos encontrar diversas clasificaciones según su material, diámetro, aplicación, rendimiento, transferencia de las gotas a través del arco y composición del revestimiento.

Por ejemplo, dentro de la clasificación de los electrodos según la transferencia de las gotas a través del arco, podemos encontrar:

- Electrodos de gota fría: son adecuados para soldadura en cualquier posición
- Electrodos de gota caliente: no son adecuados para soldadura en cualquier posición, pero en cambio, poseen una gran velocidad de fusión.

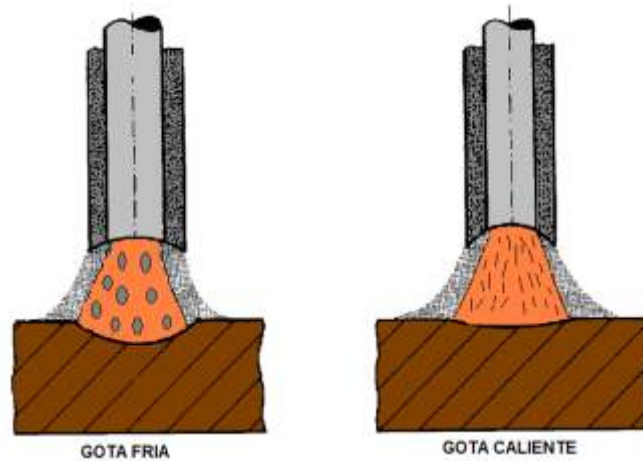


Figura 2-2: Clasificación de los electrodos, según forma de transferencia de gotas.

Por su parte dentro de la composición del revestimiento, podemos encontrar los siguientes tipos de electrodos, más generalmente utilizados:

- ***Electrodos celulósicos:***

El revestimiento de estos electrodos está formado sobre todo por celulosa integrada con aleaciones ferrosas (magnesio y silicio). El revestimiento gasifica casi completamente, permitiendo de esta manera la soldadura también en posición vertical descendiente, lo que no está permitido con otros tipos de electrodo. La elevada gasificación de la celulosa reduce la cantidad de escorias presentes en la soldadura. La elevada cantidad de hidrógeno presente hace que el baño de soldadura posea una alta temperatura, con una gran fusión de material base, obteniendo de esta manera soldaduras con gran penetración y pocas escorias en el baño. La corriente de soldadura, dada la escasa estabilidad del arco, es normalmente en corriente continua (CC) con polaridad inversa.

Son adecuados para soldar materiales oxidados, apto para soldar acero dulce (bajo % de carbono) y, por lo tanto, la gran cantidad de hidrogeno no trae inconvenientes ya que la estructura resultante es dúctil (la estructura dúctil no deja progresar las fisuras, no ocurre lo mismo con la frágil) y poco susceptible a la fisuración. Se utilizan con C.C y son generalmente utilizados para soldadura de tuberías, por la buena penetración, rapidez y velocidad de fusión.

- ***Electrodos ácidos:***

Los revestimientos de estos electrodos están formados por óxidos de hierro, aleaciones ferrosas de manganeso y silicio. Garantizan una buena estabilidad del arco que los hace idóneos tanto para la corriente alterna (CA) como para la corriente continua (CC). Tienen un baño muy fluido que no permite soldaduras en determinadas posiciones; además de que no tienen un gran poder de limpieza en el material base y esto puede causar grietas. No soportan elevadas temperaturas de secado, con el consiguiente riesgo de humedad residual y por lo tanto de inclusiones de hidrógeno en la soldadura. Solo se puede utilizar con metales base con buena soldabilidad, con contenidos muy bajos de azufre, fósforo y carbono, de lo contrario pueden presentarse fisuraciones en caliente ya que los componentes del revestimiento no son capaces de extraer el azufre y el fósforo como sí ocurre con los electrodos básicos. Tipo de corriente: C.C y C.A

- **Electrodos básicos:**

El revestimiento de los electrodos básicos está formado por óxidos de hierro, aleaciones ferrosas y sobre todo por carbonatos de calcio y magnesio a los cuales, añadiendo el fluoruro de calcio, se obtiene la fluorita, el cual es un mineral adecuado para facilitar la fusión. Tienen una elevada capacidad de depuración del material base, por lo que se obtienen soldaduras de calidad y con una notable robustez mecánica. Además, estos electrodos soportan elevadas temperaturas de secado, y por lo tanto no contaminan el baño con hidrógeno. La fluorita hace que el arco sea muy inestable, y por lo tanto el baño es menos fluido, se producen frecuentes cortocircuitos debidos a una transferencia del material de aporte con grandes gotas, provocando que el arco debe mantenerse muy corto por la escasa volatilidad del mismo revestimiento. Tienen una escoria dura y difícil de quitar. Estos electrodos se prestan para realizar soldaduras en posición vertical, por encima de la cabeza, etc.

- ***Electrodos Rutílicos:***

El revestimiento de este electrodo está compuesto esencialmente por un mineral llamado rutilo. Este último está formado por un 95% de bióxido de titanio, un compuesto muy estable que garantiza una óptima estabilidad del arco y una elevada fluidez del baño, con un apreciable efecto estético en la soldadura. La tarea del revestimiento rutilo es, en cualquier caso, garantizar una fusión dulce, de fácil realización, facilitando la formación de una escoria

abundante y viscosa que permite un buen deslizamiento en la soldadura en todas las posiciones, sobre todo en posición plana. La estabilidad del arco hace posible el empleo de este electrodo tanto con corriente alterna (CA) como con corriente continua (CC) en polaridad directa. Se usa sobre todo en espesores reducidos.

Como resumen de lo anteriormente explicado, las siguientes imágenes presentan las características mencionadas, además de comparaciones con ventajas y desventajas de los diferentes tipos de electrodos según su composición.

2.2 Electrodo de soldadura tubulares

La soldadura con electrodos tubulares viene siendo estudiado desde hace varios años debido a las características de soldadura que presenta. Esta forma de soldeo es capaz de combinar características de tres procedimientos de soldadura conocidos: Soldadura Manual con Electrodo Revestido (SMAW), Soldadura en Atmósfera de Gases Protectores (GMAW) y Soldadura Automática por Arco Sumergido (SAW).

El procedimiento de soldadura con electrodos tubulares a lo largo de la historia deriva en 2 tipos fundamentales de soldadura: con gas de protección exterior (CO₂ o mezcla de gases) y soldadura auto protegida (sin necesidad de gases). En el primer caso el gas protector puede ser CO₂ o una mezcla de Ar-CO₂ o He-CO₂ el cual protege el metal fundido del oxígeno y el nitrógeno del aire formando una envolvente alrededor del arco y sobre el metal fundido. En el segundo caso, la protección del baño es obtenida como resultado de la vaporización de los ingredientes del núcleo con el desplazamiento del aire y por la composición de la escoria que cubre el metal fundido depositado, la cual introduciendo agentes desoxidantes y desnitrificantes, que están presentes en la superficie del metal fundido, desarrollan los procesos metalúrgicos durante la soldadura.

Este procedimiento combina la versatilidad del arco manual con la velocidad de la soldadura MIG/MAG, permitiendo soldar una gran variedad de aceros y espesores, reduciendo, además, los costos del proceso. Dentro de las principales ventajas de este método de soldadura podemos encontrar:

- Altas tasas de deposición: esto se realiza debido a la alta densidad de corriente (relación entre la intensidad de corriente y el área de la sección transversal del electrodo). La densidad de corriente se aumenta a medida que se reduce el

área de la sección transversal del conductor. De esta manera, el calentamiento de la resistencia se concentra en un área muy pequeña y el electrodo con núcleo fundente alcanza su punto de fusión muy rápidamente. Esto da como resultado altas tasas de deposición.

- Perfil de penetración profunda: Debido a la forma de deposición y la alta tasa de la misma, se logra una penetración del cordón más profunda
- Versatilidad en todas las posiciones de soldado

Dentro de las características físicas de los alambres tubulares, se puede mencionar de forma general que un alambre tubular consiste en una envoltura o cinta de acero de bajo carbono que cubre o envuelve el núcleo donde están presentes los minerales que conforman el fundente, el cual a su vez está compuesto por el sistema de escoria y la carga aleante. La conformación de los electrodos se realiza de forma mecánica. El cerramiento de los mismos puede ser de dos maneras: mediante soldadura o sin soldadura (solapamiento).



Figura 2-3: Configuraciones para alambres tubulares.

Como ejemplo, se presenta el proceso de manufactura desarrollado en el laboratorio de LRSS de la UFMG para el desarrollo de los electrodos tubulares, presentado en la tesis “Efeito da adição de PTFE no fluxo de arames tubulares sobre o arco elétrico em soldagem subaquática molhada” [6]

1. Material utilizado: Acero SAE 1006, 10 mm de ancho y 0,5 mm de espesor.

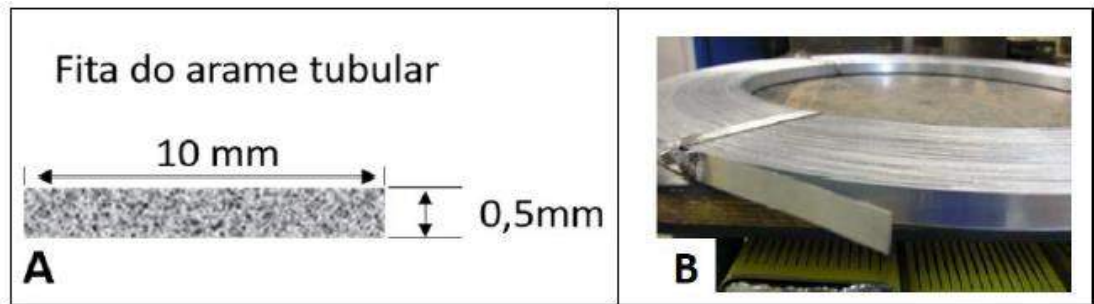


Figura 3.1 - (a) Representação esquemática da fita e (b) rolo de fita

Tabela 3.1 - Composição química da fita em porcentagem

% (massa)	Fe	Mn	C	P	S
-	99,66	0,268	0,046	0,016	0,007

Figura 2-4: Material utilizado para fabricação de los electrodos tubulares [6].

2. Elementos para flujo interno: para el flujo interno de los electrodos se utilizaron los siguientes constituyentes:

Constituinte	Função desejada
PTFE	Reduzir os teores de oxigênio e hidrogênio difusível, formar ferrita acicular, melhorar o desempenho operacional.
TiO ₂	Estabilizar o arco elétrico e formar escória.
Fe ₂ O ₃	Estabilizar o arco elétrico, formar escória e controlar a viscosidade.
Balanço	Formadores de escória, estabilizadores de arco e desoxidantes.
Pó de Ferro	Deposição e estabilizar o arco elétrico

Figura 2-5: Constituyentes para flujo interno utilizado [6].

3. Máquina utilizada: desarrollada en el laboratorio de LRSS

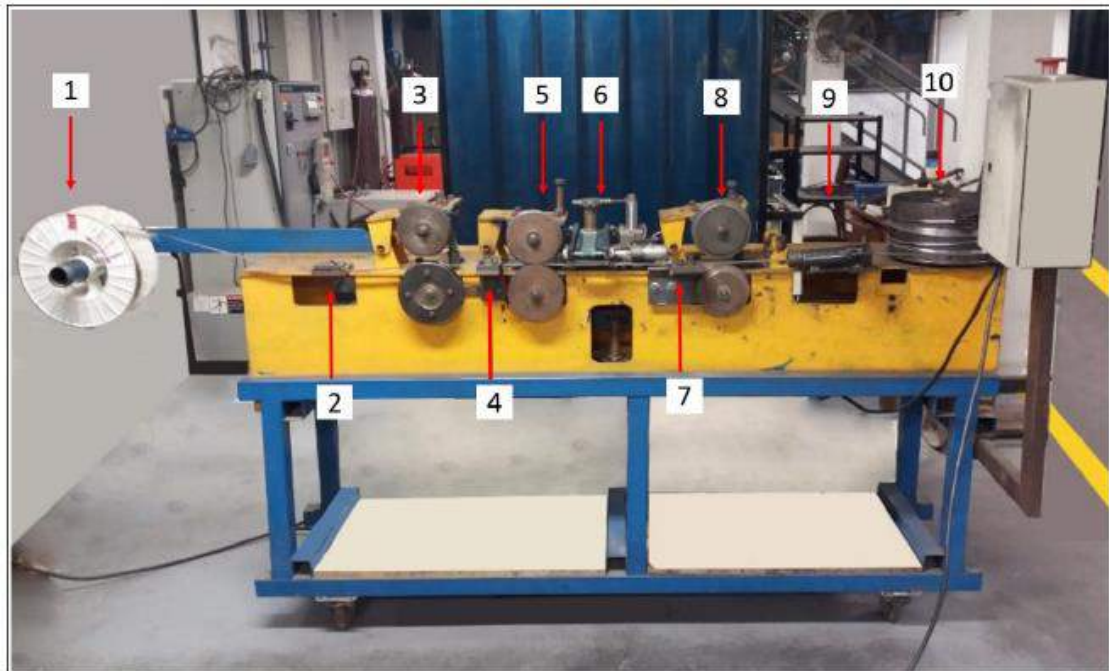


Figura 3.3 - Máquina piloto de fabricação de arame tubular: (1) carretel com a fita metálica, (3, 5 e 8) três pares de roletes de conformação nos formatos em “V” e “U” e de fechamento, respectivamente, (2, 4 e 7) guias de alinhamento da fita, (6) sistema de alimentação de fluxo, (9) caixa de acoplamento de feiras (9) e (10) tambor de tracionamento e bobinamento do arame.

Figura 2-6: Máquina desarrollada para desarrollo de alambres tubulares en el laboratorio de la UFMG

Los electrodos fabricados se utilizaron para estudiar pruebas en soldadura subacuática, campo de estudio actual de diversas tesis realizadas en el laboratorio, donde se comienza a comprobar las buenas cualidades de los electrodos tubulares con recubrimiento.

La colocación del flujo interno se realiza previamente al cerramiento del alma del electrodo, como se puede observar en la siguiente imagen.

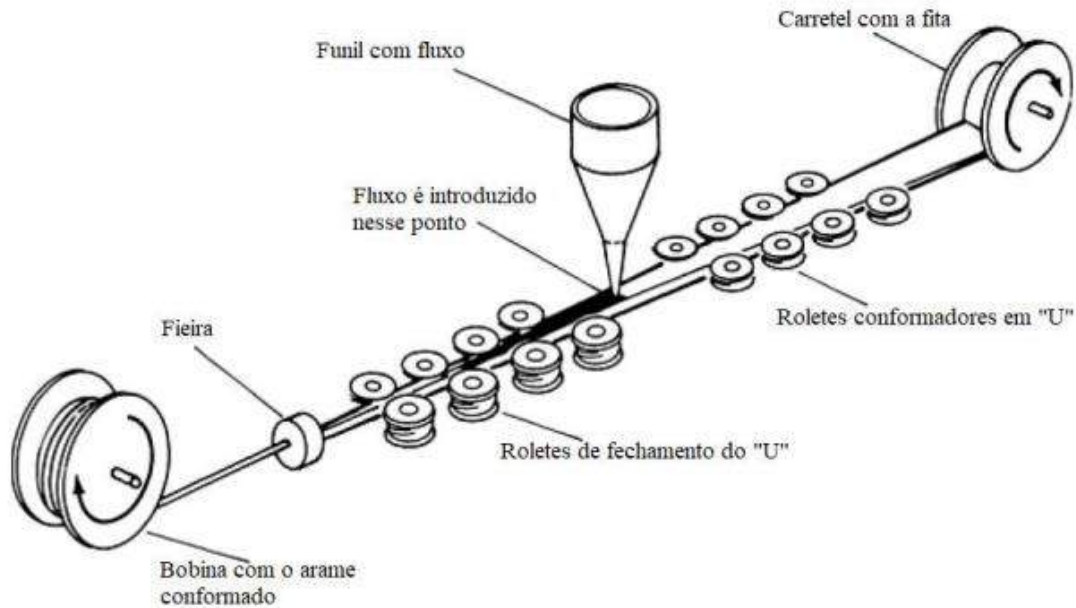


Figura 2-7: Colocación del flujo interno [11].

2.3 Electrodo tubulares revestidos

El desarrollo de los electrodos tubulares revestidos se encuentra siendo estudiado actualmente, debido a las buenas características que presenta para los procesos. Principalmente, su estudio se realiza en campos de aplicación en la soldadura subacuática, buscando como objetivo, a partir de la influencia del flujo interno del electrodo y el recubrimiento mismo, la disminución de la interacción del hidrógeno y el oxígeno con el metal de soldadura, además de que puede dar la posibilidad de aportar adicionalmente calor al electrodo, todo lo cual debe mejorar la calidad del metal depositado y, por consiguiente, las características mecánicas del cordón.

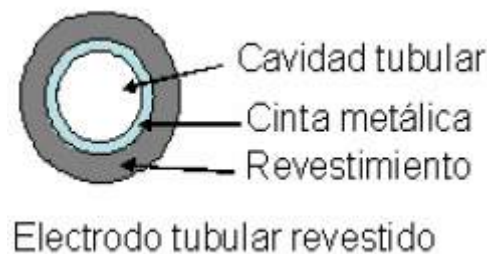


Figura 2-8: Esquema electrodo tubular revestido.

Algunos resultados de estudios realizados con electrodos tubulares revestidos en la soldadura subacuática pueden ser encontrados en las referencias adjuntas.

2.4 Fabricación de electrodos convencionales en la actualidad

En el siguiente apartado se mencionarán las principales formas convencionales e industriales para fabricar electrodos comúnmente. Se describirán los procesos que se llevan a cabo para la fabricación de los electrodos comerciales, para comenzar con el estudio del proceso que se tiene como objetivo en este proyecto: la extrusión del revestimiento.

Generalmente, la fabricación del electrodo se compone de 2 partes separadas: se realiza primeramente la fabricación del alma del electrodo. En el caso de un electrodo macizo, un alambre macizo de 6 a 8 mm que son suministrados en rollos o bobinas directamente desde la acería. En el caso de los electrodos tubulares, se fabrica el alma del electrodo mediante la conformación de una plancha de acero de bajo espesor y bajo carbono.

Antes de comenzar a hablar de las máquinas implicadas en la fabricación de los electrodos, primero se deben considerar algunas cuestiones previas. Por ejemplo: ¿Qué tipo de mercado se busca al fabricar los electrodos? ¿Se fabricarán electrodos convencionales o electrodos para usos especiales? ¿Se está planeando un producto para aplicaciones de alta calidad, con test y procesos de prueba de juntas soldadas? Dependiendo el caso, las máquinas implicadas en el desarrollo de los procesos para la fabricación variarán en funcionamiento, parámetros, calidad de componentes, además también de los componentes de recubrimientos de los electrodos, para otorgar diferentes condiciones de soldadura. Para esta investigación, se pondrá como ejemplo el desarrollo de electrodos convencionales, como lo son los electrodos macizos de tipo rutílico o celulósico.

El tipo de recubrimiento, otorgado según el tipo de electrodo y las características deseadas durante su funcionamiento, requerirán mayor o menor presión de cobertura durante su fabricación. Por lo tanto, al momento de decidir un proceso de fabricación de un electrodo, hay que tener en cuenta la capacidad de la máquina, el caudal de extrusión de recubrimiento, la presión de cobertura y la capacidad de producción de la máquina. Si se desea producir a escala industrial, las dimensiones y parámetros funcionales de la máquina serán mayores que los utilizados para fabricación a escala de laboratorio, donde solo se produce la cantidad necesaria para poder realizar las pruebas o ensayos deseados.

En una producción general, para cualquier escala, las 3 principales partes del proceso de fabricación de electrodos se pueden dividir en Máquina de recubrimiento, Mezclador y Horno.

2.4.1 Máquina de recubrimiento

Generalmente, existen 2 tipos principales de extrusoras para colocar el recubrimiento en el alma de los electrodos: *de tipo tornillo sin fin* y *de tipo hidráulico*.

2.4.1.1 Recubrimiento utilizando máquina con tornillo sin fin

En este tipo de máquinas de extrusión de recubrimientos, la pasta de recubrimiento se mueve a partir de la rotación del tornillo sin fin, para adherirse al alma del electrodo gracias a la fuerza de presión que genera el tornillo.

Previamente a ingresar al tornillo que extruirá el recubrimiento, se genera una pasta a partir de los polvos de composición según el tipo de electrodo, y un aglomerante que generalmente suelen ser silicato de potasio y silicato de sodio.

A medida que el tornillo sin fin gira, la pasta avanza hacia la boquilla de salida, donde se encuentra el dado extrusor, y a partir del paso del alambre del electrodo, se adhiere la pasta al alambre, gracias a la presión generada por el funcionamiento del tornillo.

Este tipo de máquinas son utilizadas generalmente para electrodos que no requieran una gran presión de adhesión de recubrimiento, debido a que el tornillo no suele generar grandes presiones en su funcionamiento. Por ejemplo, un caso típico de utilización para este tipo de máquinas son los electrodos rutilicos (E6013), debido a la presencia de polvo de mica, que le da una buena fluidez a la pasta.

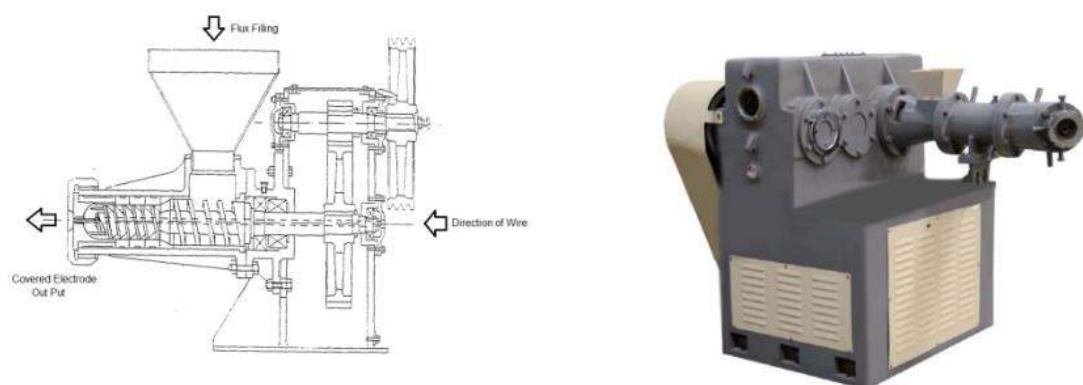


Figura 2-9: Máquina de recubrimiento por tornillo sin fin.

La dirección de avance del alambre (alma del electrodo) puede ser en la misma dirección de movimiento de la pasta o en ángulo con respecto a la misma, como se puede observar en la siguiente imagen

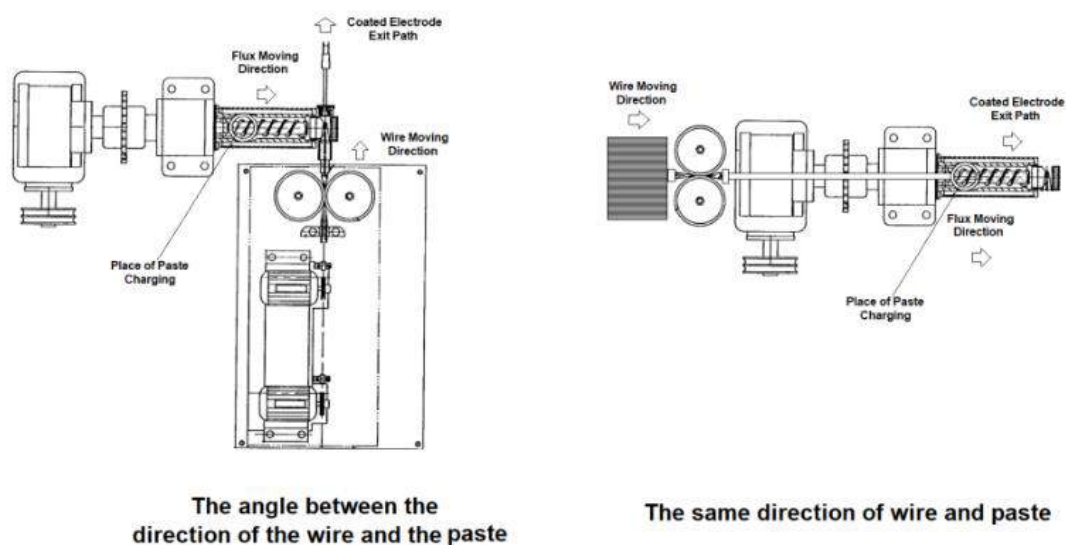


Figura 2-10: Direcciones de inserción de los alambres

Existen diversos estudios y patentes diseñadas para la extrusión a partir de tornillos sin fin. El funcionamiento y componentes son similares para la extrusión tanto de polímeros, plásticos, y, en este caso, pastas para recubrimientos de electrodos. A continuación, se mostrarán en las siguientes imágenes, diferentes diseños comerciales con sus parámetros de funcionamiento, además de patentes que se pueden encontrar en la investigación del caso.



No.	Name	Data
1	Diameter of Powder cylinder	100mm
2	Operating board height	990mm
3	Reamer speed	31~60r.p.m
4	Motor power	22kw
5	Overall dimensions	1490×1040×1290mm
6	Net weight	2.2t

Figura 2-11: Máquina de extrusión de recubrimientos de electrodo por tornillo.
Fuente: Hebei China Welding



E6013 Welding Electrode Screw Type Extrusion Machine

This machine is used for continuously welding flux pressing and coating onto electrodes surface(E6013/E7018). Large screw pressing shaft is adopted to coat the flux onto electrode surface slowly and stably. Independent lubricating system is used for reliable and convenient long time using.

No.	Parameter	HLD100
1	Diameter of powder barrel(mm)	100mm
2	Rotation speeding of screw stem(r/min)	65, 76, 86 r/min
3	Mould head for powder coating	45°(water cooling type)
4	Suitable pressed welding electrode(mm)	Diameter: 2.5-5.8, Length: 300-450.
5	Motor Power (KW)	30
6	Centre height of installation (mm)	1000
7	Productive capacity(Ton/year)	>2000
8	Dimension(mm)	1600*1250*1450
9	Weight(kgs)	2350

Figura 2-12: Maquina industrial para extrusión de recubrimientos para electrodos por tonillo. Fuente: Suntechmach



Figura 2-13: Máquina industrial extrusora de plásticos (ABS, PC, PP). Fuente: NJTD

EXTRUSORAS de Laboratorio de 1 solo Husillo



- ❑ 20 mm, 30 L/D Modelo de sobremesa
- ❑ 25 mm, 30 L/D Modelo de suelo, versiones con o sin ventilación
- ❑ 30 mm, 30 L/D Modelo de suelo, versiones con o sin ventilación

Corte abierto en la punta del husillo para optimizar la eficiencia de mezclado

EXTRUSORAS DE UN SOLO HUSILLO				
Tipo de extrusora		LE20-30	LE25-30	LE30-30
Tipos de tornillos estándar	Compresión abierta	Ratio 1:3	Ratio 1:3	Ratio 1:3
	Versión sin ventilación		Maddocka 20D + piña en la punta de husillo	Maddocka 20D + piña en la punta de husillo
	Versión ventilada		Maddocka 15D + brida de división en la punta del husillo	Maddocka 15D + brida de división en la punta del husillo
Versión		Sobremesa con sub-cabina opcional	Tipo suelo	Tipo Suelo
Diámetro de husillo	mm	20	25	30
Ratio Husillo L/D		30	30	30
Potencia Motor	kW	1.5	4	7.5
Rango de velocidad de husillo	RPM	0-150	0-300	0-250
Número de zonas calefactoras en el cilindro		3	4	4
Controladores de temperatura adicionales (más bajo demanda)		1	1	1
Enfriamiento por aire en todas las zonas del cilindro		Sí	Sí	Sí
Potencia del calentador	W	1.970	4.000	8.400
Salida max aprox con LD-PE,	Kg/Hora	6	15	25
Dimensiones		95x62x75	170x73x167	190x61x167

Figura 2-14: Extrusora (HDPE, LDPE, PP, PS, PA, PLA) para usos de laboratorio de un husillo. Fuente: TECHLAB Systems

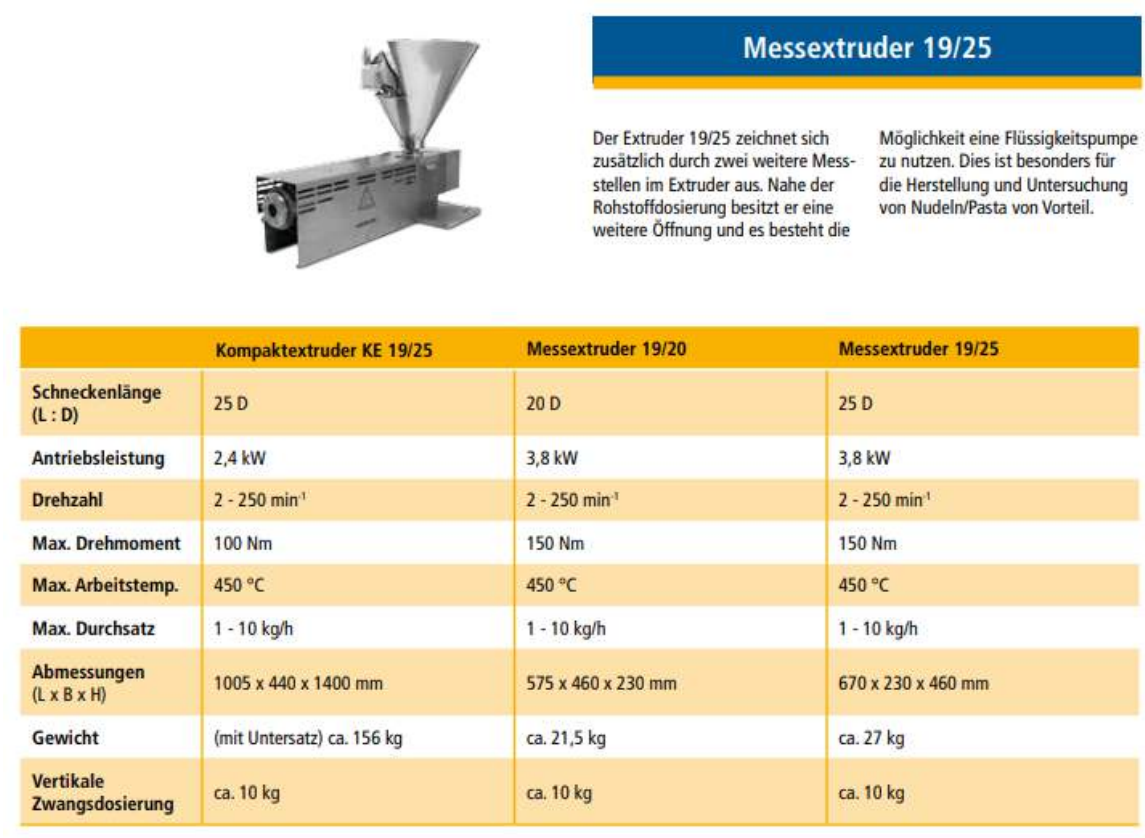


Figura 2-15: Extrusora de laboratorio usos generales monohusillo. Fuente: Brabender



Figura 2-16: Extrusora de escala laboratorio. Fuente: Huede Machinery



Model	L/D	Output(kg/h)	Speed(r/min)	Drive power(kw)
SJ-25	25/1	1-2	20-120	2.2
SJ-30	25/1	10	20-180	5.5
SJ-45	25-33/1	50-150	20-150	7.5-22
SJ-65	25-33/1	60-250	20-150	22-90
SJ-75	25-33/1	200-350	20-150	55-110
SJ-90	25-33/1	180-550	20-110	37-185
SJ-120	25-33/1	320-800	20-90	75-280
SJ-150	25-33/1	400-1200	20-75	90-355

Figura 2-17: Máquina extrusora de laboratorio monohusillo. Fuente: Shuzou ACC Machine Co



Model	SJ-25
L/D	25:1
Screw diameter(mm)	25
Main Motor Power(kw)	2.2
Maximum Capacity(kg/h)	2-3
Heating Power(kw)	1.5

Figura 2-18: Máquina extrusora de laboratorio monohusillo (PVC, ABS, PLA, etc). Fuente: Shuzou ACC Machine Co.



Model	Screw Diameter (mm)	L/D	Screw RPM	Main motor KW	Capacity kg/h
Sj-20	20	25	90/120	1.5/2.2	2-6
Sj-30	30	25-32	90/120	4/5.5	5-20
Sj-40	40	28-36	90/120	11/15	15-40
Sj-50	50	28-36	90/120	15/30	30-60
Sj-65	65	28-36	90/120	30/37	40-100
Sj-75	75	28-36	90/120	45	60-150
Sj-90	90	28-36	90/120	55	250-350
Sj-100	100	28-36	90/120	75	350-450
Sj-120	120	28-36	90/120	90	450-600
Sj-150	150	28-36	90	110-160	400-600
Sj-180	180	28-36	90	160-200	500-700
Sj-200	200	28-36	90	200-250	800-1000

Figura 2-19: Extrusoras Series Sj monohusillo. Fuente: Nanjing Jieya

Las anteriores imágenes proporcionan, además de ejemplos reales y prácticos dentro del área industrial (gran producción) y del área de laboratorios (pequeña producción para experimentos), referencias acerca de los tamaños, potencias, formas, y caudales de extrusión que existen en la actualidad.

Como anteriormente se mencionó, existen numerosas patentes que desarrollan el mismo funcionamiento de extrusión con tornillo sin fin. Algunas de ellas:

- Patente ES388095A1 “Un dispositivo de prensa de hélice para la fabricación del revestimiento de electrodos de soldadura” – GEBR. BOHLER & CO. AKTIENGESELLSCHAFT – Austria

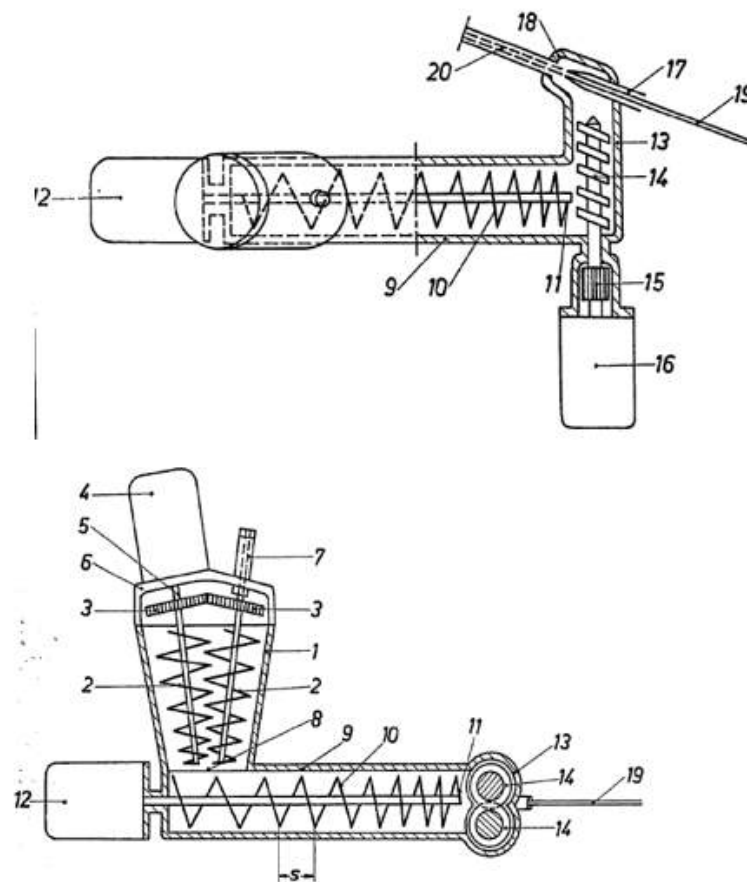


Figura 2-20: Patente de invención de extrusora para fabricación de revestimiento de electrodos

- Patente GB 745726 A "Improvements in or relating to the extrusion of multi-layer sheathing for electric cables". Diseña una manera de extruir un cable eléctrico a partir de un sistema con tornillo sin fin.

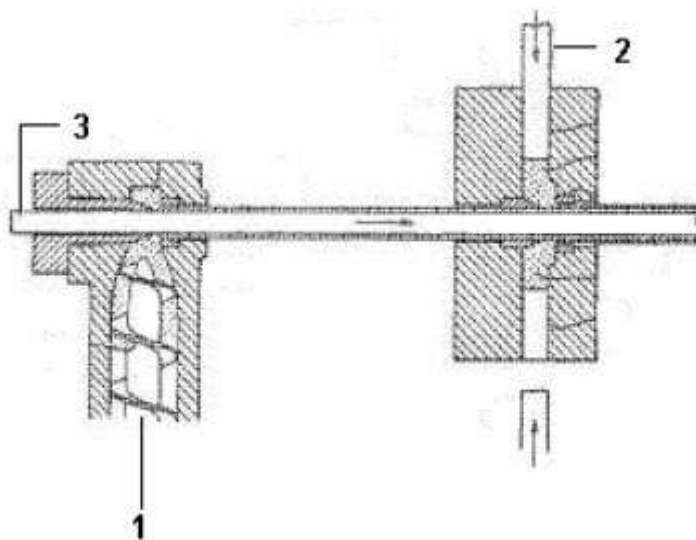


Figura 2-21: Diseño de Patente GB 745726 A

Dentro de las ventajas que podemos encontrar con este tipo de método de extrusión, podemos encontrar, por ejemplo, la posibilidad de extruir continuamente, es decir, tener una capacidad de producción por hora según los parámetros de diseño de la máquina, pero en forma continua a lo largo del tiempo. Además, los costos iniciales y de manutención no son mayores a los del otro método utilizado.

2.4.1.2 Recubrimiento utilizando máquina hidráulica

Continuando con la segunda clasificación de máquinas para poder extruir y colocar el recubrimiento en los electrodos, se presentan las máquinas con pistón hidráulico.



Figura 2-22: Máquina de recubrimiento de tipo hidráulico

En este tipo de máquinas de recubrimiento, primeramente, se fabrican unas “briquetas” de pasta de materiales para recubrimiento en una prensa hidráulica

externa. Las briquetas son fabricadas según los componentes del electrodo que se quiera fabricar, adicionado con silicato de potasio o silicato de sodio para poder aglomerar los mismos.



Figura 2-23: Briqueta de pasta para recubrimiento de electrodos. Fuente: ¿QUE Y COMO SE HACE? - Cómo se hacen los ELECTRODOS?

Luego, esta briqueta se coloca sobre el interior del cilindro hidráulico y se procede a extruir mediante la presión que genera el pistón hidráulico.



Figura 2-24: Briqueta colocada en el interior del cilindro hidráulico para posterior extrusión. Fuente: ¿QUE Y COMO SE HACE? - Cómo se hacen los ELECTRODOS?

En este tipo de máquinas, debido a la presión que genera el pistón hidráulico sobre la briqueta colocada, la pasta se presiona y recubre la superficie del alambre que pasa por el extremo de la extrusora. Gracias a la mayor presión que permite este sistema, se pueden extruir gran variedad de electrodos, principalmente los que no poseen una gran fluidez en los materiales de su recubrimiento.

Los siguientes parámetros son los más importantes en el diseño de la máquina de recubrimiento por pistón hidráulico:

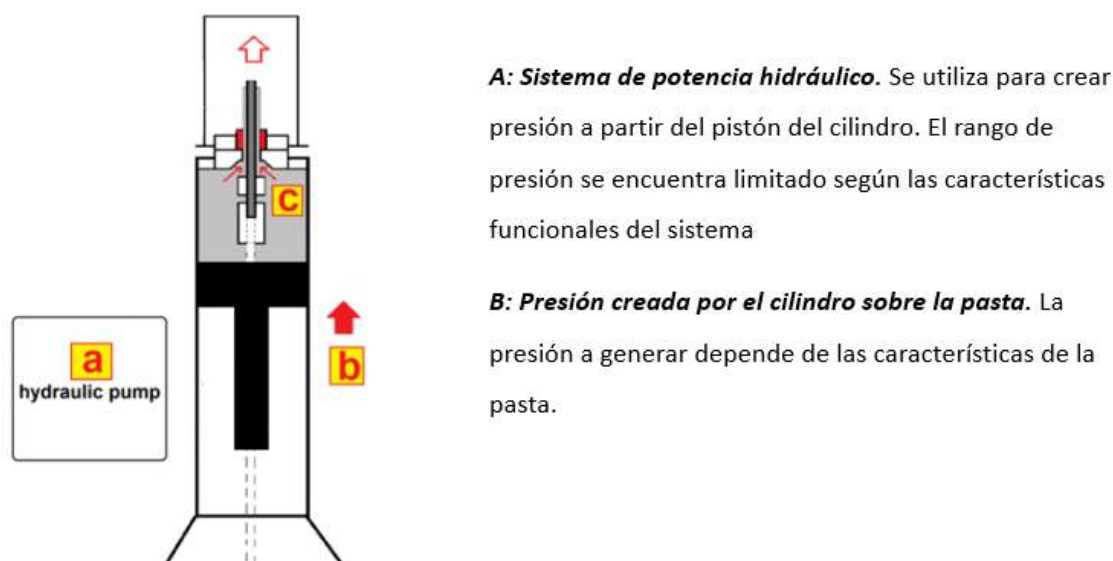


Figura 2-25: Parámetros importantes en el diseño de extrusores de pistón hidráulico para fabricación de electrodos de soldadura

El avance del alambre sobre la pasta que se encuentra siendo extruida puede ser de diferentes formas, como se puede observar en la siguiente imagen:

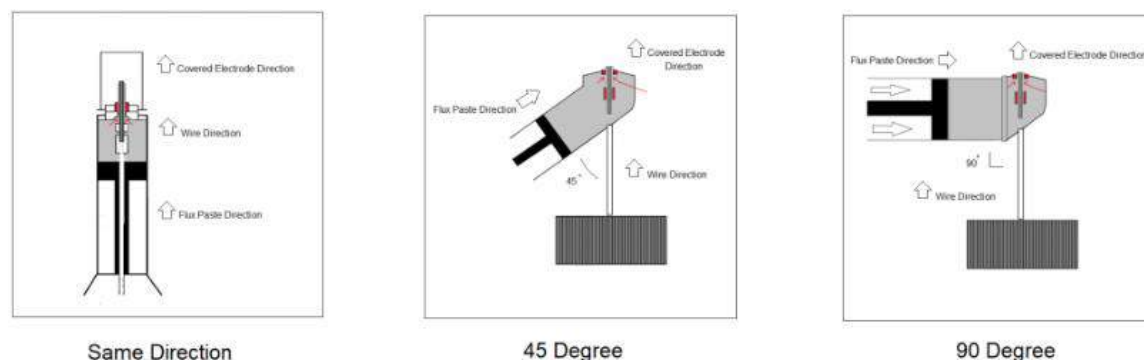


Figura 2-26: Direcciones de sentido de avance del alambre con respecto al flujo de la pasta extruida

En este tipo de sistema, la pasta se adiciona al exterior del electrodo debido a la presión que genera el pistón hidráulico al realizar la fuerza de empuje sobre la briqueta. De esta manera, la boquilla de salida se puede observar de la siguiente manera, donde generalmente la mezcla extruida incide sobre el exterior del alambre del electrodo directamente y de esta manera se adiciona sobre la superficie.

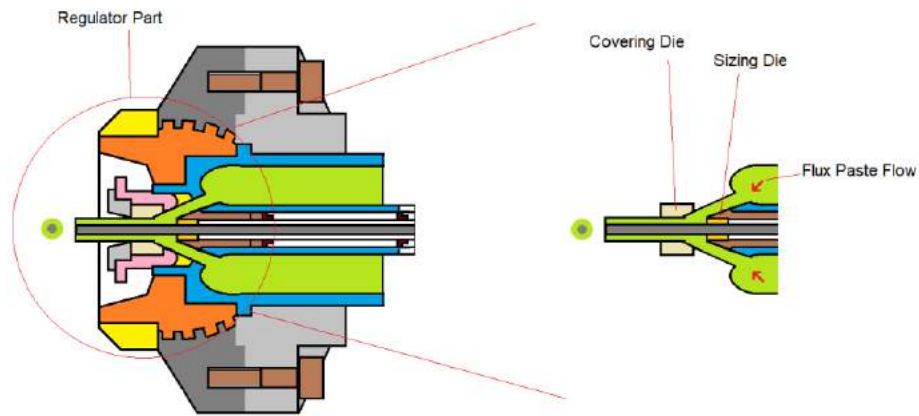


Figura 2-27: Boquilla de salida en el extrusor hidráulico.

Como se puede observar en la anterior imagen, el extremo de la extrusora está formado por varias piezas, las cuales algunas pueden ser intercambiables, como por ejemplo el tamaño del dado extrusor (sizing die), el cual puede variar el diámetro del recubrimiento a extruir. Esta pieza suele fabricarse de carburo de tungsteno.

Algunas máquinas también suelen tener un “centrador” de alambre para que el recubrimiento quede centrado sobre el mismo, como se muestra en la siguiente figura:

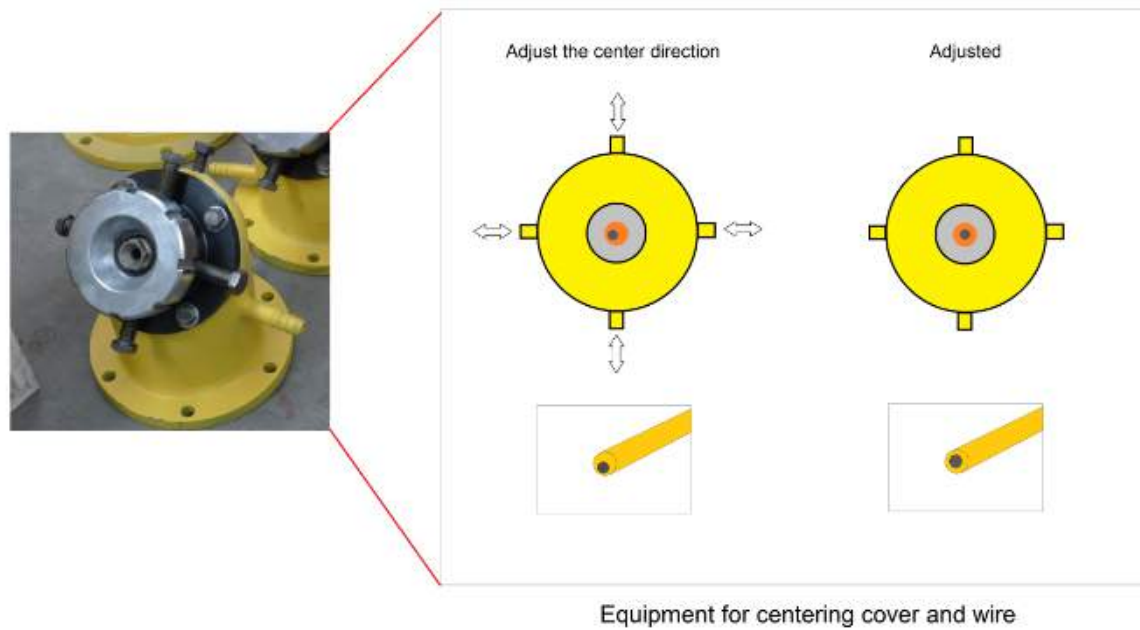


Figura 2-28: Dispositivo centrador del alambre en extrusoras hidráulicas.

Como en el anterior caso, se presentarán máquinas extrusoras industriales, patentes y diseños que pueden ser encontrados en la actualidad.



Figura 2-29: Extrusor hidráulico. Fuente: Omega Welrod Systems



MACHINERIES	NOS/CAPACITY/HP/KW						
	1 MT	2MT	3MT	4MT	5MT	8MT	10MT
WIRE DRAWING MACHINE	Not feasible			1 X 160HP	1 x 160HP	2 X 160HP (320HP)	2 X 160HP (320HP)
DRY MIXER	1 X 500KG 5HP	1 X 500KG 5HP	1 X 750KG 7.5HP	1 X 1000KG 10HP	1 X 1000KG 10HP	2 X 1000KG 10HP (20HP)	2 X 1000KG 10HP (20HP)
WET MIXER	1 X 30KG 3HP	1 X75KG 5HP	1 X 75KG 5HP	1X 100KG 7.5HP	1X 100KG 7.5HP	2 X 100KG 7.5HP (15HP)	2 X 100KG 7.5HP (15HP)
CUTTING AND STRAIGHTENING	1 X 120PCS 5HP	1 X 200PCS 8.5HP	2 X 200PCS 8.5HP (17HP)	3 X 200PCS 8.5HP (25.5HP)	3 X 200PCS 8.5HP (25.5HP)	4 X 200PCS 8.5HP (34HP)	5 X 200PCS 8.5HP (42.5HP)
BRIQUETTING PRESS	1 X 2HP	1 X 3HP	1 X 3HP	1 X 5HP	1 X 5HP	1 X 5 HP	2 X 5HP (10HP)
EXTRUSION PRESS (Wire feeder, Extruder & Conveyor)	1 X 10.5HP	1 X 13.75HP	1 X 15.5HP	1 X 20HP	1 X 22.5HP	1 X 30HP	2 X 22.5HP (45HP)

Figura 2-30: Maquina y parámetros de extrusión según capacidades de producción.
Fuente: Gangaa machines

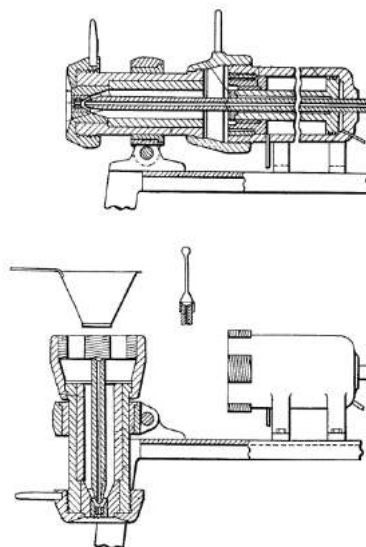


Figura 2-31: diseño de extrusora hidráulica. Fuente: wespec.net

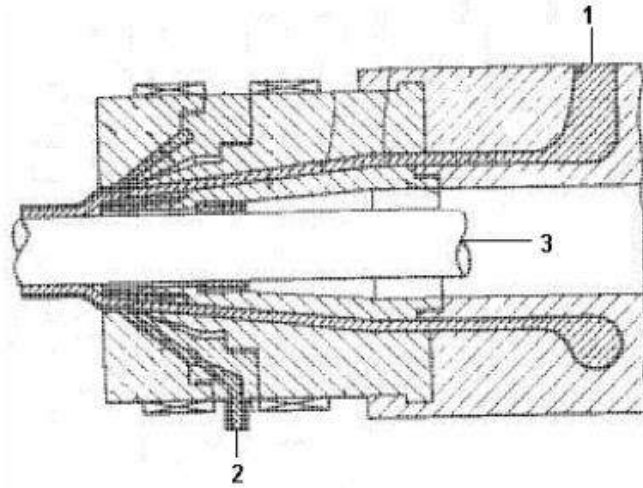


Figura 2-32: Patente JP 59029141 A para doble recubrimiento de perfiles cilíndricos

Dentro de las ventajas que se obtienen utilizando este tipo de maquinaria, podemos encontrar, por ejemplo, la capacidad de ajustar la presión hidráulica para poder variar la densidad del recubrimiento en el electrodo, la posibilidad de fabricar electrodos con doble recubrimiento, la posibilidad de poder fabricar electrodos que requieren un recubrimiento que para fabricarlo precise de mayor presión.

Por su parte, dentro de las desventajas podemos encontrar que su capacidad de producción se encuentra limitada por las dimensiones de la máquina y la capacidad de carga que posea el cilindro para almacenar las briquetas que serán extruidas, además de mayores costos de manutención e inversión.

2.4.2 Mezclador

El mezclador tiene como objetivo poder homogeneizar la mezcla de recubrimiento del electrodo, ya sea porque se va a ingresar la misma al extrusor con tornillo sin fin, o porque se fabricarán las briquetas para la posterior extrusión en el extrusor hidráulico.

El tipo de mezclador va a depender de varios factores, como el tamaño, la potencia de mezclado y la homogeneidad que se requiera para la mezcla. Por ejemplo, para los electrodos celulósicos, los cuales tienen elementos como celulosa en un 40%, además de polvos de níquel y ferromanganeso, requieren un mezclador especial adecuado para la función.

Los mezcladores según su función, pueden ser de 2 tipos: mezcladores secos y mezcladores húmedos.

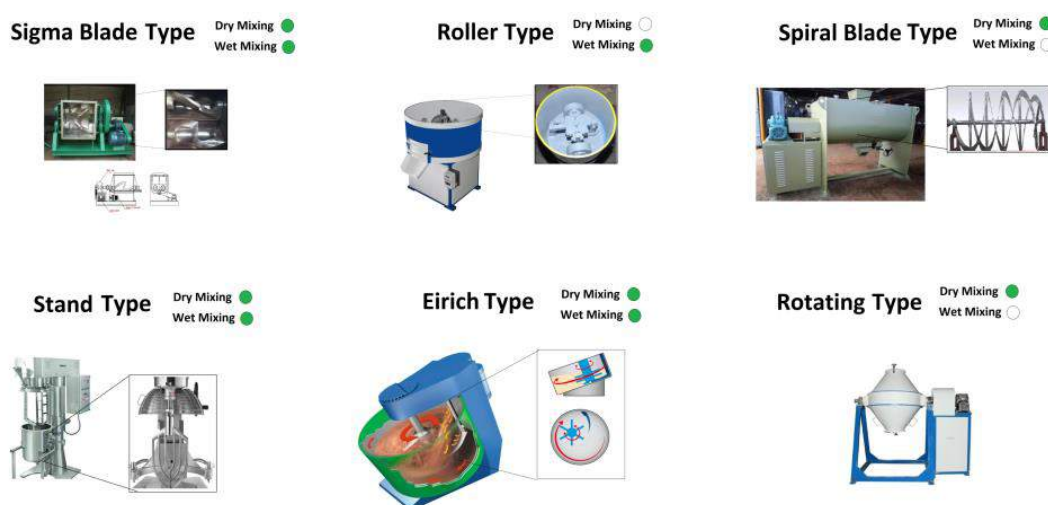


Figura 2-33: Tipos de mezcladores para mezclas de recubrimientos de electrodos

Generalmente, el mezclador seco se utiliza para homogeneizar los polvos que serán parte del recubrimiento del electrodo, tales como celulosa, mica, dióxidos, entre otros. Estos se adicionan con una fórmula química previamente definida para el electrodo.

Posteriormente, la mezcla seca pasa al mezclador húmedo donde se adiciona, en los casos convencionales, silicato de sodio o silicato de potasio para realizar la aglomeración de todos los componentes y formar una pasta que luego será extruida.

En nuevos casos de estudio, tal como el presentado en la tesis *Efeito da adição de PTFE no fluxo de arames tubulares sobre o arco elétrico em soldagem subaquática molhada* [6], se estudia la adición de un polímero como aglomerante húmedo. Este polímero (en la tesis fue utilizado PTFE) proporciona buenas características a la soldadura.

2.4.3 Horno

El horneado de los electrodos resulta importante para poder finalizar su fabricación, ya que, de esta manera, se obtiene el secado de los elementos componentes de la pasta extruida. Por lo tanto, el secado mediante calor debe tener sus características según el tipo de electrodo que se encuentre fabricando, variando temperaturas y tiempos de cocción para poder lograr que todas las capas de recubrimiento se encuentren a la misma temperatura.

Existen principalmente 2 tipos principales de horneados: el horneado estático y el horneado continuo.

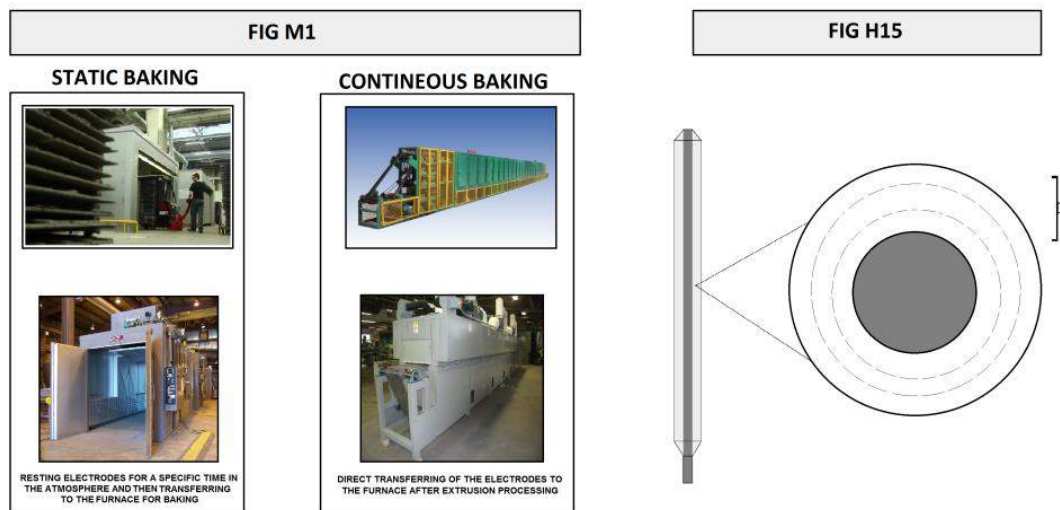


Figura 2-34: Tipos de horneado para electrodos con recubrimiento.

Como conclusión del proceso, en la siguiente figura se puede observar el flujo de operaciones y cada máquina utilizada en el mismo, proveída por un vendedor, a nivel industrial.

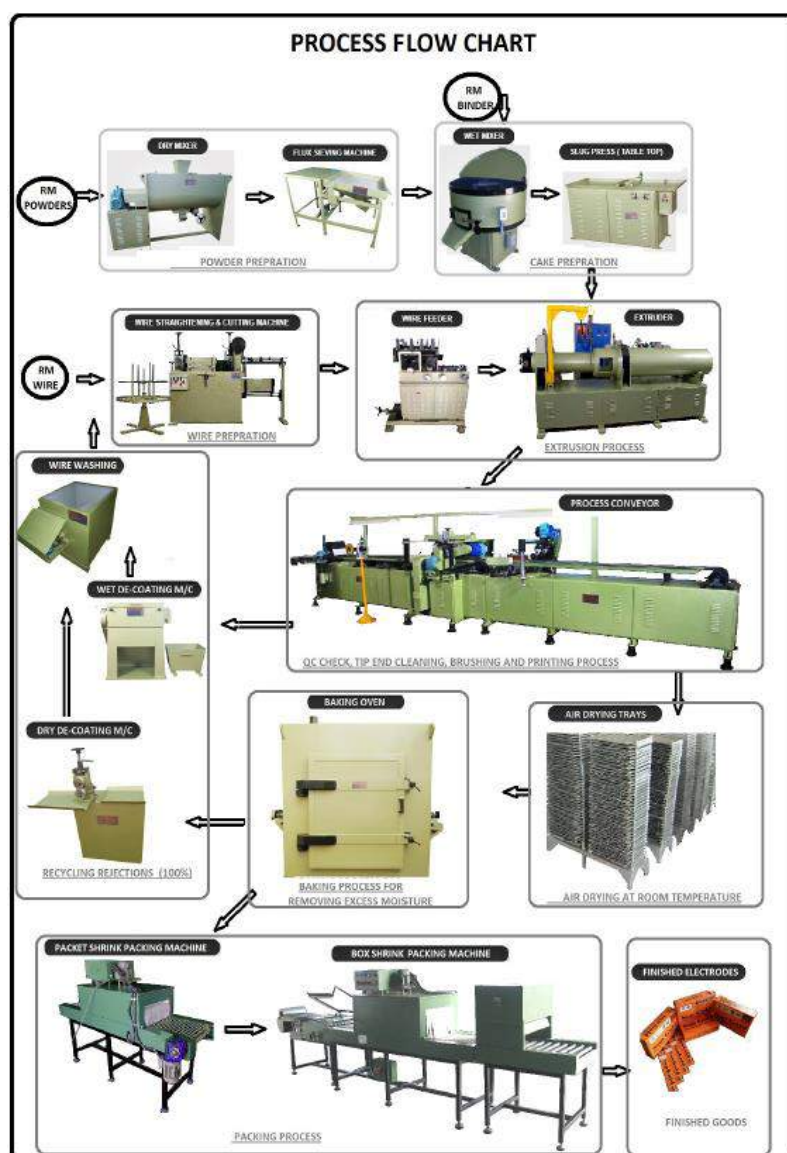


Figura 2-35: flujo de proceso industrial de producción de electrodos. Fuente: Gangaa Machines

2.5 Componentes básicos y funcionamiento de una extrusora de tornillo

Dentro de las extrusoras de tornillo se pueden mencionar diversos tipos, dependiendo de las características que se requieran y el tipo de funcionamiento de la misma. Dentro de las principales complicaciones al momento de tener que seleccionar una extrusora de tornillo comercialmente, se presenta el tipo: extrusoras de un solo husillo y extrusores de doble husillo.

La diferencia entre ambas puede darse a partir del tipo de polímero/material a extruir y la complejidad del proceso, tanto como el control de los parámetros y la presión a

generar. En las siguientes imágenes se pueden observar diferencias entre las extrusoras mono husillo y doble husillo utilizadas en la actualidad.

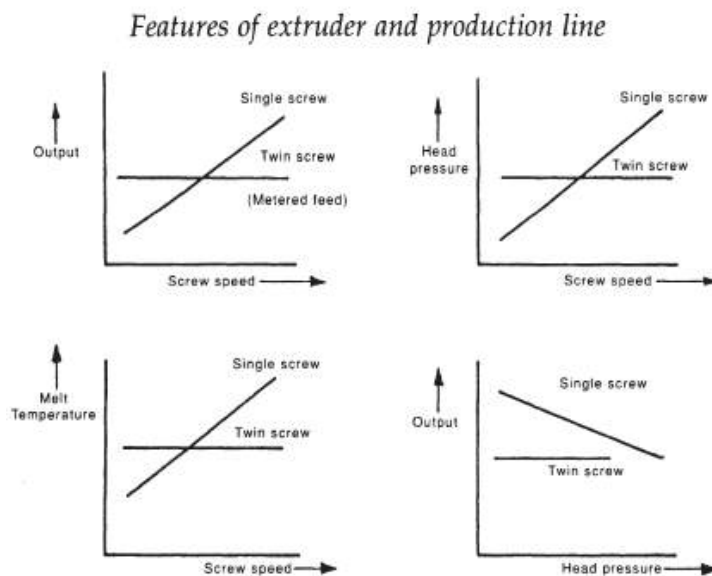


Figura 2-36: Diferencias según variaciones en las características de las extrusoras [12].

	<i>Single-screw</i>	<i>Twin-screw</i>
Flow type	Drag	Near positive
Residence time and distribution	Medium/wide	Low/narrow (useful for reaction)
Effect of back pressure on output	Reduces output	Slight/moderate effect on output
Shear in channel	High (useful for stable polymers)	Low (useful for PVC)
Overall mixing	Poor/medium	Good (useful for compounding)
Power absorption and heat generation	High (may be adiabatic)	Low (mainly conductive heating)
Maximum screw speed	High (output limited by melting, stability, etc.)	Medium (limits output)
Thrust capacity	High	Low (limits pressure)
Mechanical construction	Robust, simple	Complicated
First cost	Moderate	High

Figura 2-37: Comparación entre extrusoras de simple husillo y de doble husillo [12]

Como se puede observar en las anteriores imágenes, las diferencias se encuentran según las presiones, velocidades de giro del tornillo, potencias, formas de utilización, entre otras.

El caudal de extrusión, presión del cabezal y temperatura de proceso obtenidos con las extrusoras de simple husillo son directamente proporcionales al aumento de las RPM del husillo, a diferencia de las extrusoras de doble husillo que pueden mantener los parámetros constantes. Por su parte, el caudal obtenido por las extrusoras simple husillo disminuye al aumentar la presión de salida.

Las extrusoras de doble husillo son generalmente utilizadas para materiales más complejos y que requieren mayor control de los parámetros, con mayor presión y temperatura. Por lo tanto, para extrusión de simples polímeros son utilizadas las extrusoras de simple husillo, permitiendo obtener variaciones en su desempeño al variar las características como la velocidad de rotación o la presión.

Para este caso, se seleccionará una extrusora de mono husillo debido a que la extrusión a realizar no presenta complicaciones ni parámetros especiales a ser tenidos en cuenta, además de que resulta una máquina más sencilla y económica. Como referencia, también se pueden encontrar este tipo de extrusoras para laboratorio comercialmente, lo que indica que la elección de la misma es certera.

En las extrusoras mono husillo, se puede encontrar el siguiente esquema básico de componentes:

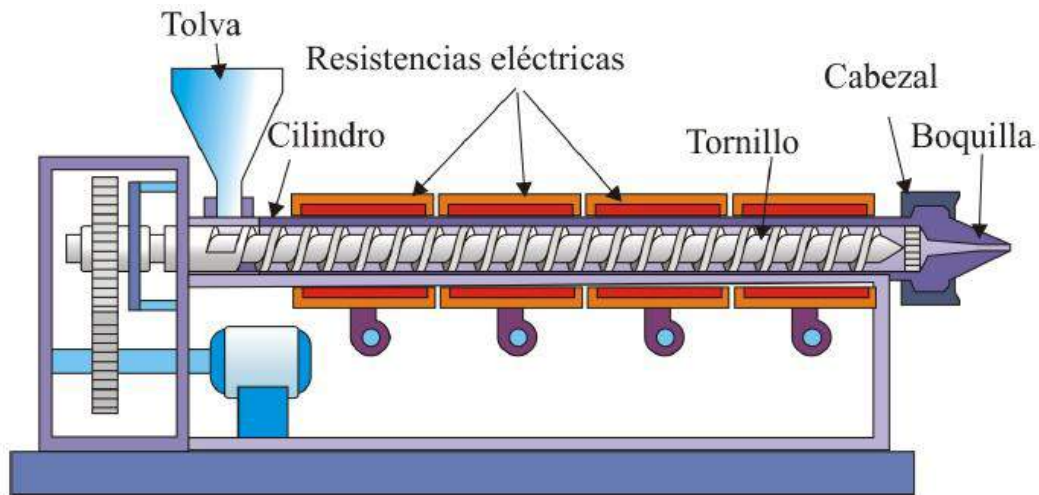


Figura 2-38: Esquema de partes principales de una extrusora mono husillo.

En una definición amplia el proceso de extrusión hace referencia a cualquier operación de transformación en la que un material fundido es forzado a atravesar una boquilla para producir un artículo de sección transversal constante y, en principio, longitud indefinida. El proceso de extrusión se utiliza para aproximadamente el 60% de la conformación de materiales plásticos. Para el caso más usual de extrusión, la extrusora puede cumplir con las siguientes funciones, no necesariamente ocurriendo todas las mencionadas a continuación durante un proceso de extrusión:

- Transporte del material sólido hacia la zona de fusión
- Fusión o plastificación del material
- Transporte o bombeo y presurización del fundido
- Mezclado
- Desgasificado
- Conformado

Dentro del funcionamiento de las extrusoras de tornillo, se puede comenzar a explicar su funcionamiento a partir de los componentes, como se observar en la anterior imagen. Generalmente, el accionamiento del tornillo se realiza mediante un motor eléctrico, el cual posee una transmisión de potencia que puede ser por medio de engranajes, cadenas, directa, entre otras.

Siguiente de la transmisión de potencia, se encuentran rodamientos axiales y radiales que permiten soportar ambas cargas generadas durante la extrusión.

A partir de la fuente motriz y su transmisión, se consigue el giro del tornillo, el cual se encuentra dentro del cilindro por donde fluirá el material a ser extruido. El material que se desea extruir se ingresa a partir de la tolva, pudiendo ser en forma de polvos, gránulos, pequeños objetos sólidos o mezclas, la cual se encuentra ubicada en el inicio del cilindro. La alimentación puede ser forzada o simplemente por gravedad.

A medida que el tornillo gira, el material comienza a avanzar por el cilindro hacia la boquilla de salida. Durante este proceso y a modo de conseguir una homogeneización del material a extruir, se utilizan resistencias eléctricas para poder calentar la mezcla hasta un punto deseado. En las extrusiones generales de plásticos, se calienta el material hasta su punto de fusión.

Al llegar el material al final del tornillo, se encuentra con un plato rompedor, el cual posee pequeños agujeros que permiten que el flujo helicoidal proveniente del tornillo se transforme en un flujo laminar, también aumentando su presión. Tanto el plato rompedor como la boquilla de salida, que posee la forma deseada de extrusión, se encuentran ubicadas en el cabezal de extrusión.

Las características de accionamiento del tornillo para la extrusión dependen de la velocidad de giro, ángulo de hélice de la espiral y del coeficiente de fricción, que surge como consecuencia del roce del material con las paredes del cilindro y la superficie del husillo. Estos coeficientes dependen, principalmente, del material a transformar y de la temperatura de las superficies del cilindro y del tornillo. El material será impulsado con mayor efectividad por el tornillo cuanto mayor sea la fricción entre el material y las paredes del cilindro, y cuanto menor sea en la superficie del tornillo. Para reducir la fricción entre el material a ser extruido y el tornillo, se puede utilizar refrigeración de este último.

El calentamiento excesivo del cilindro, mediante las resistencias eléctricas, disminuye la eficiencia del proceso de extrusión, debido a la destrucción térmica de las capas del material cercanas a su superficie; además, la elevación de la temperatura en la zona de carga del cilindro puede ocasionar la fusión del material, disminuyendo al mismo tiempo la capacidad de adhesión y por lo tanto, el arrastre el material por los primeros filetes del tornillo.

Todas las extrusoras poseen en su tornillo tres zonas bien diferenciadas: zona de alimentación, zona de compresión y zona de dosificación. A continuación, se presentarán en detalle los elementos constituyentes de una extrusora convencional.

2.5.1 Tolva

La tolva es el contenedor que proporcionará alimentación de material al tornillo sin fin. En ella se deposita el material, ya sea en forma de polvos, mezclas, gránulos o pequeños elementos sólidos. En la misma, la tolva, garganta de alimentación y boquilla de ensamble deben estar perfectamente ensambladas para poder proporcionar un flujo constante al tornillo extrusor.

Las mismas pueden construirse de forma cilíndrica y cónica o de forma prismática, resultando la primera opción más cara y difícil de construir. La tolva debe construirse de manera de que pueda contener una cantidad de material que permita el funcionamiento continuo de la extrusora durante un período de tiempo determinado. A continuación, se pueden observar imágenes representativas de tolvas comúnmente utilizadas:

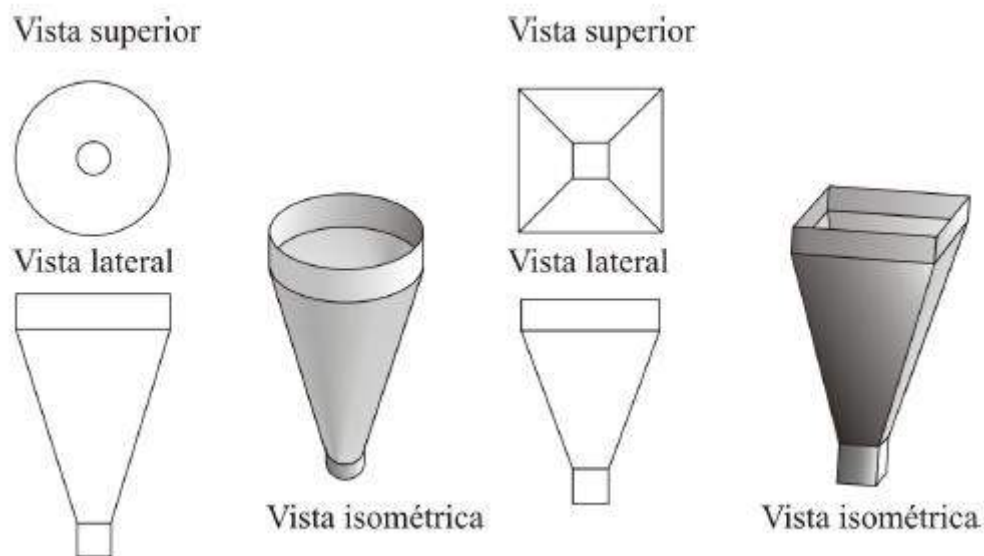


Figura 2-39: Tipos de tolvas

La alimentación del material a extruir al tornillo puede realizarse de manera forzada, para asegurar un flujo constante, o simplemente por gravedad. En la siguiente imagen se puede observar el diseño de una tolva para extrusoras que realiza un mezclado previo de los materiales a extruir, forzando mediante un tornillo sin fin el ingreso de la mezcla.

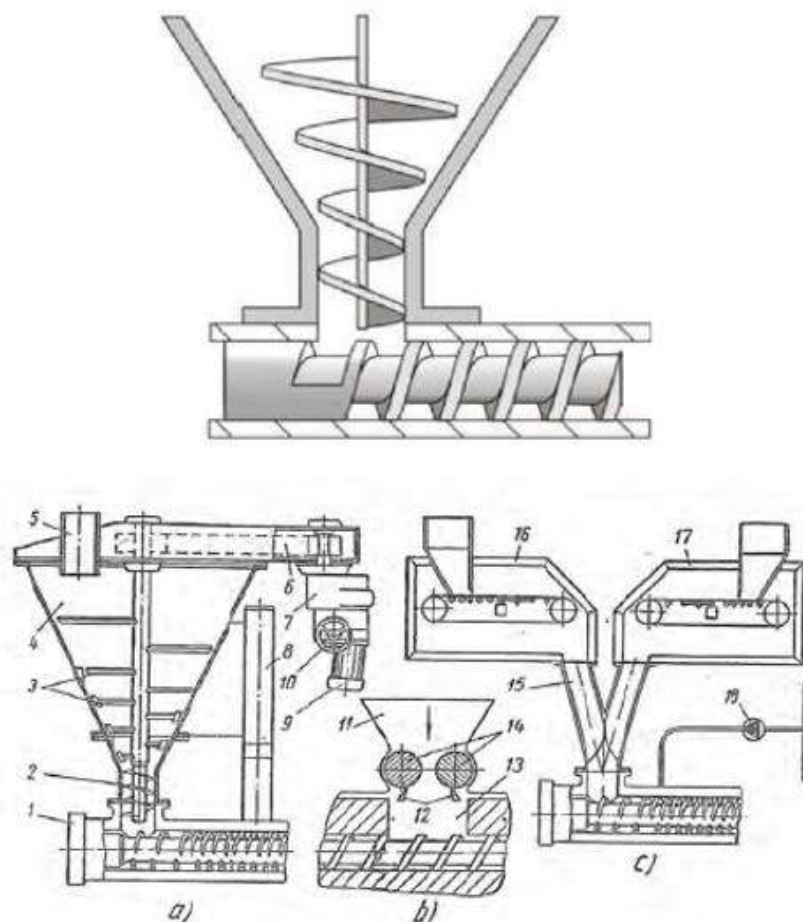


Figura 2-40: Diseños de tolvas.

La garganta de alimentación suele ser generalmente entre 1,2 a 1,5 veces del diámetro.

2.5.2 Cilindro

El cilindro contiene en su interior el tornillo que será elemento de transporte y extrusión del material. Como anteriormente se mencionó, la superficie interna del cilindro genera las cargas de esfuerzos cortantes (fuerzas de cizallamiento) que sufrirán los gránulos de material a extruir. El mismo debe tener una compatibilidad con el material a extruir y también una resistencia óptima al material se estará procesando. Por lo tanto, se fabrican generalmente de aceros aleados y, cuando sea necesario, también se realizan tratamientos de endurecimiento superficial en las paredes internas, que están expuestas a los efectos de la abrasión y corrosión durante la operación de la máquina. Generalmente, los cilindros pueden recubrirse en su interior con un nitrurado de aproximadamente 1 a 1,5 mm de espesor. Hoy en día, son fabricados también

cilindros bimetálicos con aleaciones que permiten que la duración del mismo sea de 3 veces más que las de los cilindros nitrurados.

Además de soportar los esfuerzos de cizallamiento, el cilindro debe soportar las presiones que se generan en el interior del mismo y las temperaturas de calentamiento generadas por las resistencias eléctricas, que se colocan en el exterior del mismo.

Un aspecto muy importante en el diseño de un cilindro es el huelgo que existirá entre la cresta de los filetes del tornillo y la superficie interior del cilindro. Esta distancia debe ser tal que permita que exista una fricción baja en la superficie del tornillo y alta en la pared del cilindro. De otra manera, el material podría rotar con el tornillo sin moverse en dirección axial. Por lo tanto, la distancia de huelgo radial suele utilizarse entre 0,002 y 0,005 veces el diámetro de tornillo.



Figura 2-41: Ejemplo de cilindro para extrusora. Fuente: Stebo SRL

2.5.3 Tornillo

El tornillo es el órgano fundamental de trabajo de una extrusora. Tanto la producción como la aplicación de la extrusora dependen del diámetro del tornillo, de la relación de su longitud con el diámetro (L/D), de la velocidad de giro y de las particularidades geométricas del canal helicoidal, perfil del vértice de los filetes y del cabezal, cantidad de zonas, entre las principales.

Generalmente, la relación más utilizada para extrusoras se encuentra entre 20-30:1, pudiendo llegar a 40:1 pero no siendo tan recomendada. Es importante cumplir con las especificaciones recomendadas debido a que, si se aumenta aún más la longitud del tornillo, se aumenta el efecto del calor sobre el material, la velocidad de giro y la

producción de la extrusora, aumentando al mismo tiempo la potencia de accionamiento, generando un costo más alto de la maquinaria.

Según el tipo de material a transformar y la finalidad del mismo, los tornillos se construyen de uno o varios canales, con paso y profundidad del canal constante o variable. Sin embargo, por su mayor capacidad de producción y facilidad de fabricación generalmente se emplean los husillos de paso constante y profundidad del canal variable, con 3 etapas en el tornillo bien definidas.

El grado de compresión, es decir, la relación de los volúmenes de los canales helicoidales en las áreas correspondientes a un paso de las zonas de alimentación y compresión se encuentra en el intervalo de 1,5:1 a 5:1, siendo 3:1 el valor medio más utilizado para extrusión de plásticos.

Así, se pueden encontrar parametrizados las características geométricas de tornillos funcionales para extrusoras, como se observa en la siguiente imagen:

Diámetro D	Paso t	Profundidad del canal en la zona de alimentación, h_1	Profundidad del canal en la zona de extrusión, h_2	Anchura de la cresta del filete, e
32	32	6	1,9	3,8
45	45	8	2,1	5
63	63	9,6	2,4	6,3
90	90	11,2	2,8	9
125	125	13,5	3,2	12
160	160	15	3,7	15

Figura 2-42: Parámetros geométricos para diferentes diámetros [4].

De diámetro constante y mayor profundidad de filete, es la zona donde el material a ser extruido ingresa. Como anteriormente se explicó, el avance del material al encontrarse con el avance de los filetes del tornillo dependerá de la fricción que exista entre el material y el tornillo (se busca minimizar) y la fricción entre el material y el cilindro (se busca maximizar).

La fricción también depende de la temperatura y en algunos casos y para algunos tipos de materiales a extruir, se debe refrigerar la zona de alimentación del tornillo para reducir la fricción entre el material y el tornillo.

A continuación, se muestra una imagen de los coeficientes de fricción de diferentes polímeros para diferentes temperaturas.

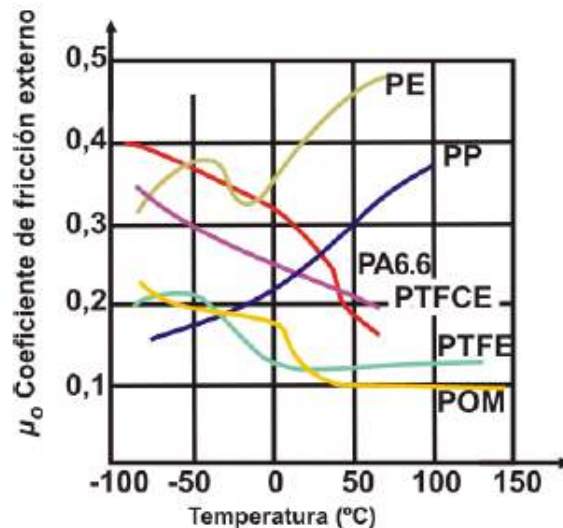


Figura 2-43: Coeficientes de fricción para diferentes temperaturas.

Se puede observar que, por ejemplo, para el PTFE, el coeficiente de fricción es mínimo a temperaturas ambiente (0 a 25°C) por lo que no haría falta una refrigeración del tornillo en caso de extrusión del mismo.

La teoría de transporte de sólidos indica que el material debe “adherirse al cilindro y deslizar sobre el tornillo, de modo que el material se desplace hacia adelante”. De esta manera, y debido a los diferentes coeficientes de fricción que poseen diferentes materiales, la longitud de la zona de alimentación será mayor o menor, dependiendo del caso.

2.5.3.2 Zona de Compresión

Es la zona del tornillo con diámetro variable, en donde tiene lugar la mayor parte de la fusión del polímero. La profundidad del filete va disminuyendo a medida que se avanza, provocando la fusión del material y aumentando la presión del mismo.

Entre las primeras funciones que tiene la zona de compresión, se pueden mencionar, entre otras, expulsar el aire atrapado entre los gránulos de material, mejorar la transferencia de calor de las paredes del cilindro al material conforme se disminuye la profundidad del filete y, en tercer lugar, es el lugar donde se provoca el cambio de densidad debido a la fusión del material a ser extruido.

2.5.3.3 Zona de dosificación

En esta última etapa la profundidad del filete es la menor de todas las etapas, logrando una mayor presión y obteniendo el fluido completamente viscoso para extruir por la boquilla.

El fluido termina su proceso con una determinada presión y temperatura, saliendo del tornillo hacia la placa rompedora.

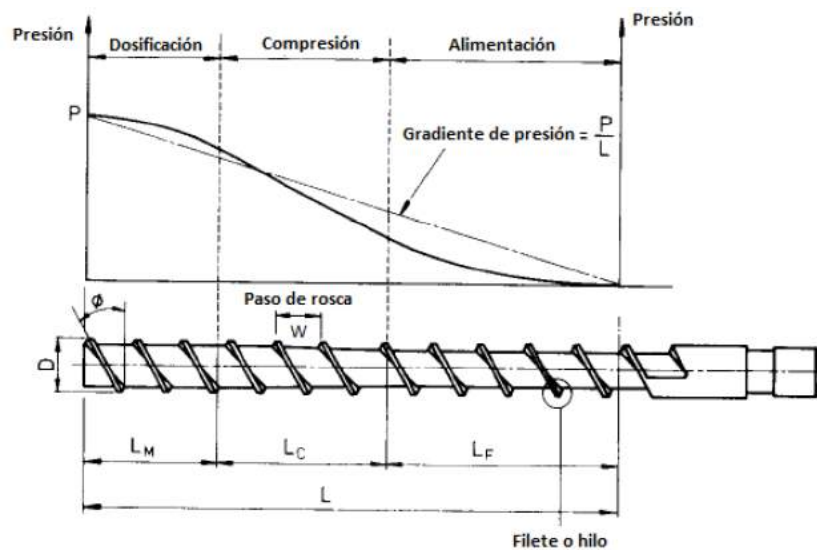


Figura 2-44: Presión en las diferentes etapas del tornillo.



Figura 2-45: Ejemplos tornillos de extrusoras.

A modo de ejemplo se presentan diferentes tipos de tornillos con diferentes configuraciones:

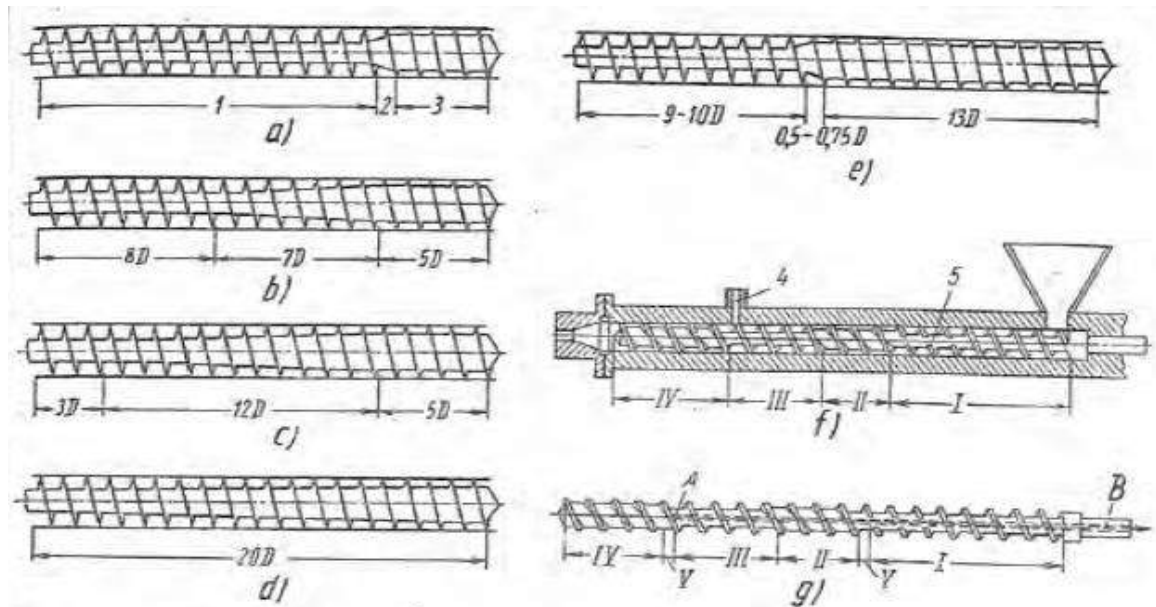


FIG. 8. Husillos generalmente empleados en la transformación de diversos materiales termoplásticos:
 a, husillo con zona de alimentación larga y zona de compresión corta; b y c, husillos con zona de compresión larga; d, husillo con una zona de compresión creciente para transformar cloruro de polivinilo; e, husillo con zona de compresión corta para la transformación de polietileno; f, husillo de dos etapas con zona de descompresión; g, husillo con zona de descompresión y canal de succión por vacío.

Figura 2-46: Diferentes tipos de tornillos para extrusión.

2.5.4 Cabezal

El cabezal es la zona donde se descarga el fluido. Generalmente se fabrica de acero tratado térmicamente, con agujeros para poder montarlo en la brida final del cilindro. Debe poder soportar los elementos constituyentes y también soportar la presión máxima, que se genera en el final de la extrusión.

La función principal del cabezal extrusor es controlar la forma del producto extruido. El diseño del mismo requiere: minimizar las zonas de estancamiento y residencia de la mezcla extruida a partir de la correcta geometría de las zonas, ángulos de ingreso de la mezcla lo más bajos posibles y superficie interior pulida para minimizar las fuerzas de rozamiento y obtener la mejor terminación superficial posible.

Se pueden clasificar según su performance de producción. Pueden clasificarse:

- 1- Axiales o en la misma dirección del flujo de extrusión proveniente del tornillo, con canales simétricos, particularmente para tubos, cilindros y filamentos.

-
- 2- Cabezales angulares o perpendiculares, que poseen un ángulo con respecto a la dirección del flujo proveniente del tornillo, utilizados para recubrimientos de alambres y cables
 - 3- Cabezales de extrusión para perfiles, que incluyen boquillas con ranura para películas y láminas planas, además de la opción de múltiples orificios para monofilamentos.
 - 4- Cabezales para productos especiales, como redes.

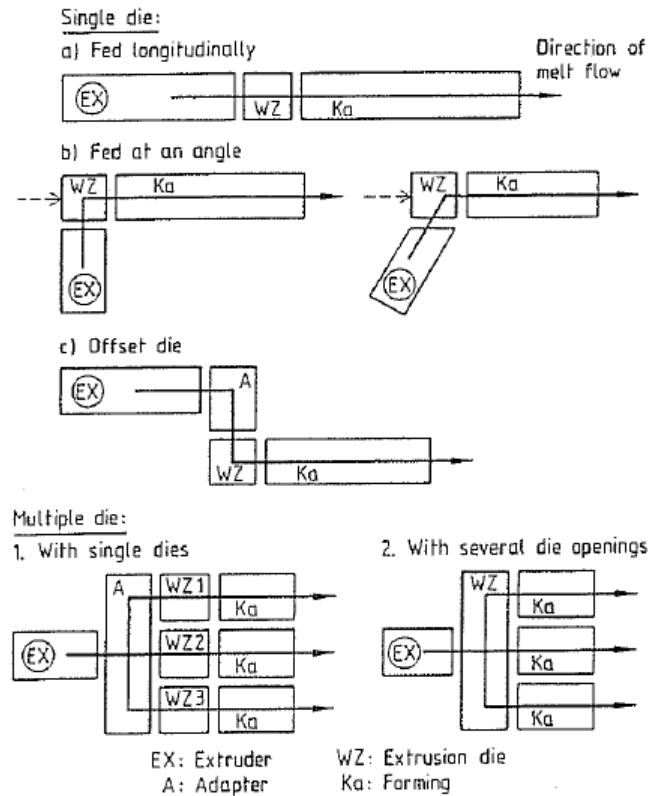


Figura 2-47: Diferentes configuraciones de extrusoras [3].

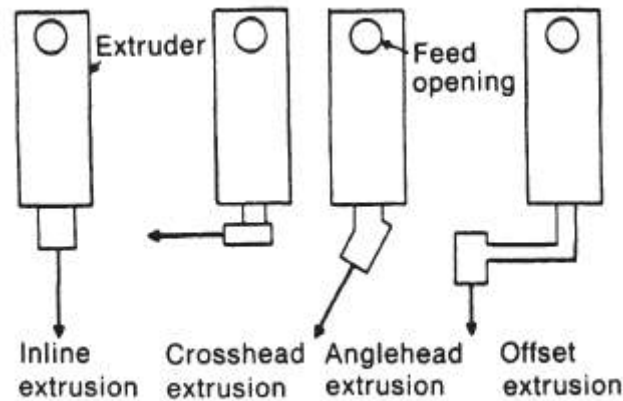


Figura 2-48: Diferentes configuraciones de extrusoras [3].

La unión entre el cabezal y el tornillo puede realizarse de diferentes maneras, tales como la unión a partir de bulones o sistemas de fijación, siendo la más utilizada la utilización de bridas abulonadas.

Las superficies internas del cabezal deben tener un buen acabado, de otra manera, el producto extruido puede resultar áspero y con imperfecciones.

Para el correcto diseño de los cabezales de extrusión, diversos parámetros son tenidos en cuenta, los cuáles afectan directamente al caudal y a la calidad del producto obtenido.

El factor más importante en un cabezal de extrusión es la caída de presión. Los parámetros de entrada para el diseño, son:

- La geometría del producto semi-terminado (forma del extruido).
- La manera en la que el cabezal de extrusión es alimentado, además de la alimentación de los componentes adicionales del producto que pasen por el cabezal (en caso que los haya)
- Las características del material a ser procesado
- El punto de operación de la máquina, el cual relaciona la funcionalidad del tornillo y el cabezal de extrusión, a partir del caudal y la presión de operación. Este factor es de importancia para el diseño del cabezal extrusor, debido a que, a partir del mismo, se pueden obtener las presiones y caudales de operación de la máquina.

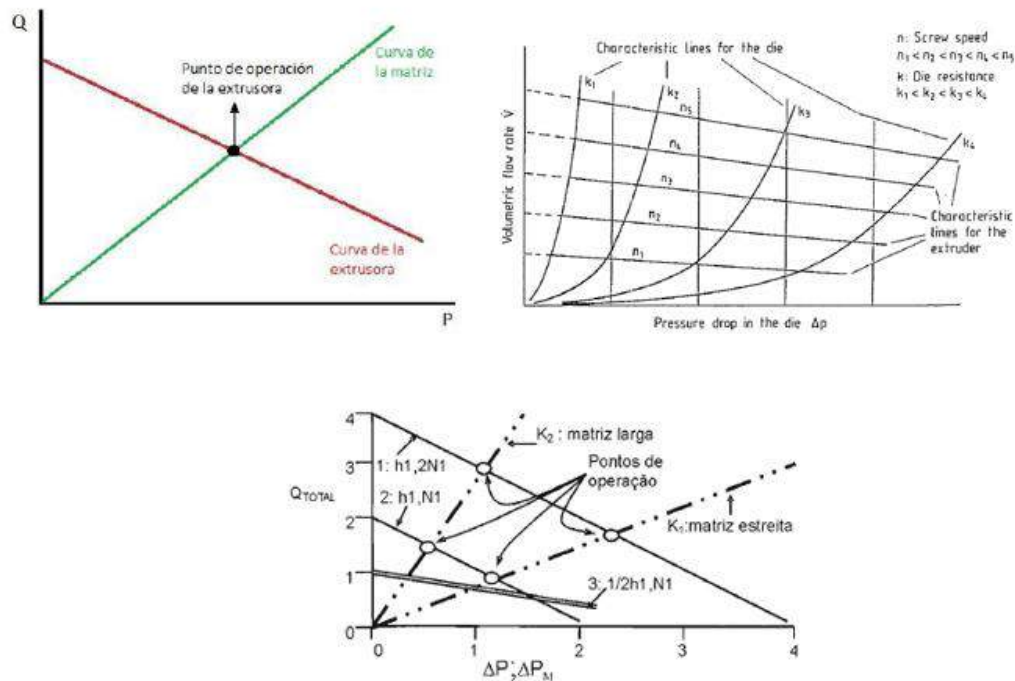


Figura 2-49: Parámetros del cabezal.

Para diferentes geometrías de cabezal (k), y para diferentes curvas características del extrusor (n), se obtendrán, para una determinada caída de presión, un determinado flujo volumétrico.

Cada punto de operación es único para un determinado conjunto de herramientas (rosca, cabezal extrusor) y materiales (polímeros), como también para un conjunto de parámetros de extrusión como las RPM y la temperatura.

Para encontrar los puntos de operación de una extrusora, es necesario calcular diferentes puntos de caudal, variando los parámetros de extrusión (RPM, T).

2.5.4.1 Componentes del cabezal

En general, los cabezales de extrusión se encuentran compuestos por diferentes componentes que, sumados entre todos, hacen al funcionamiento del mismo. En el caso de un cabezal extrusor anular convencional, las partes constitutivas son las siguientes:

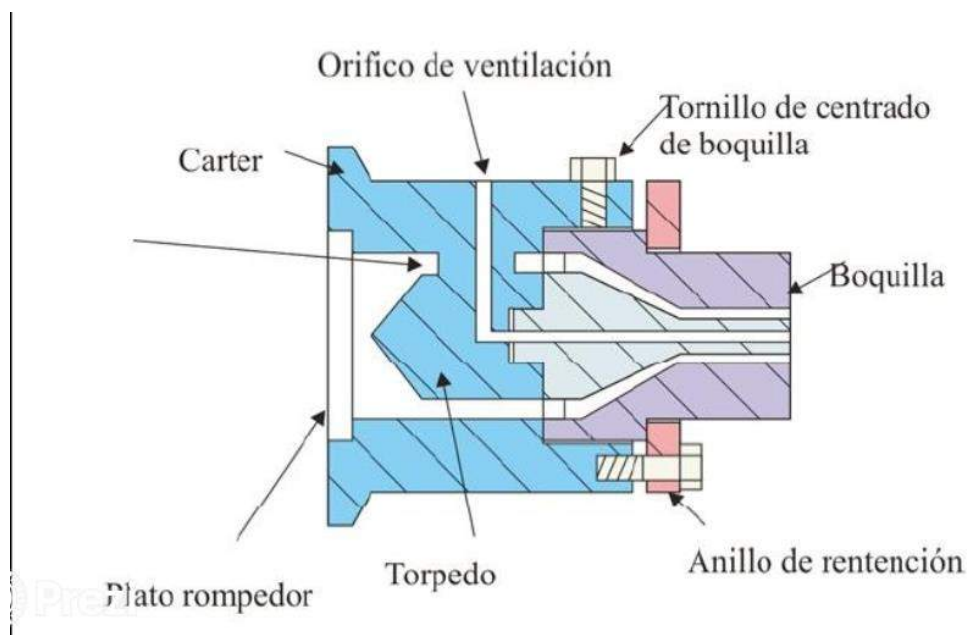


Figura 2-50: Partes del cabezal [13].

- 1- **Placa rompedora:** luego del tornillo extrusor, se encuentra en el cabezal un elemento utilizado para distribuir el fundido con presiones iguales en todas las direcciones del sentido de flujo. Debido a que la masa proviene del tornillo y el cilindro en forma de hélice, la placa rompedora se utiliza para romper el flujo helicoidal y formar un flujo recto en la misma dirección que el canal en el cual se encuentra. En la misma, también se suelen aplicar filtros de diferente malla para poder filtrar la granulometría de la masa.

Conforme se ensucian las mallas es necesario sustituirlas para evitar una caída de presión excesiva y que disminuya la producción. Por ello, el diseño del plato debe ser tal que pueda ser reemplazado con facilidad.

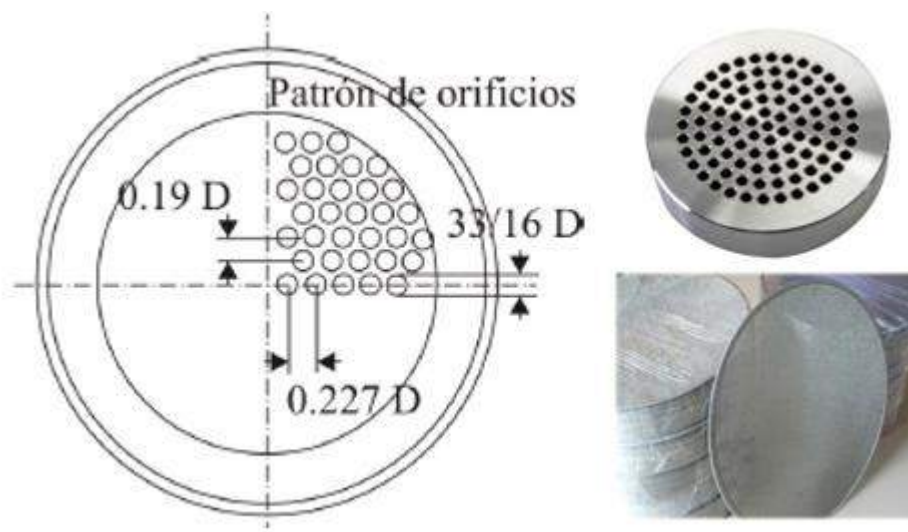


Figura 2-52: Placa rompedora [13].

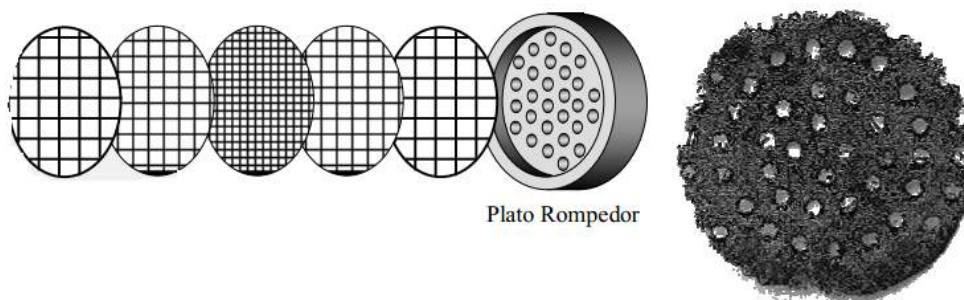


Figura 2-53: Plato rompedor y filtros. Fuente: plasticsplanet.com

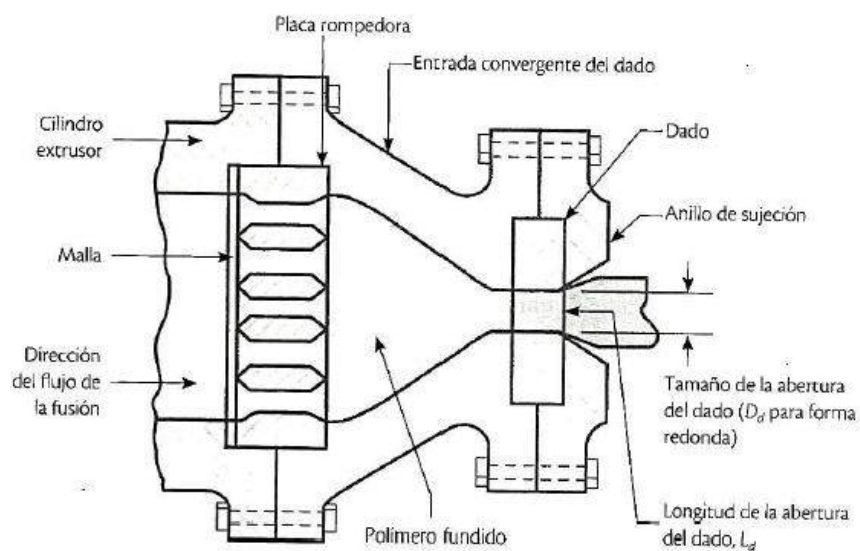


Figura 2-54: Cabezal de la extrusora y sus elementos

Las funciones del paquete de filtros son las siguientes:

- Romper el flujo de material fundido, distribuirlos convenientemente y dar un movimiento consistente hacia adelante, con una contrapresión controlada
- Impedir la continuidad de porciones frías de material hasta que tenga la misma plasticidad que el resto del material
- Retener, en general, impurezas y aglomerados que podrían contaminar el producto final deseado
- Regular la presión del extrusor

2- Conducto de ingreso de flujo: posterior al plato rompedor, el conducto de entrada hacia el cabezal le indica al flujo la dirección hacia la extrusión. Además, este soporte se utiliza como adaptador a la salida del cilindro, realizando la unión al mismo mediante bridas abulonadas. El contacto y el cierre entre los componentes debe ser de alta precisión para evitar fugas.

3- Housing central: El soporte central es el que sostiene al mandril, la boquilla y demás elementos del cabezal. Sobre el mismo se suelen colocar, en caso de ser necesario, los calefactores de resistencia eléctrica que mantienen la temperatura de la mezcla constante. Además, soporta las presiones internas que se dan en el cabezal, por lo que debe poseer el espesor necesario.

4- Mandril: es la parte central del cabezal y el que hace posible que el flujo se extruya sobre un canal anular. Existen diferentes tipos, entre los cuales se pueden encontrar:

- a) Mandril fijado por crucetas:** Las crucetas son divisiones (o “patas de araña”, entre 3 y 12, normalmente 8) que fijan el mandril al housing central. El vacío entre el mandril y el housing es el canal por donde el fluido fluye. El fluido, al pasar por las divisiones, se divide y se vuelve a unir luego de las mismas, provocando en su unión una marcada línea, característica en cabezales que no se encuentran bien diseñados. En algunos casos, el mandril puede tener un ajuste fino de centralización mediante tornillos laterales.

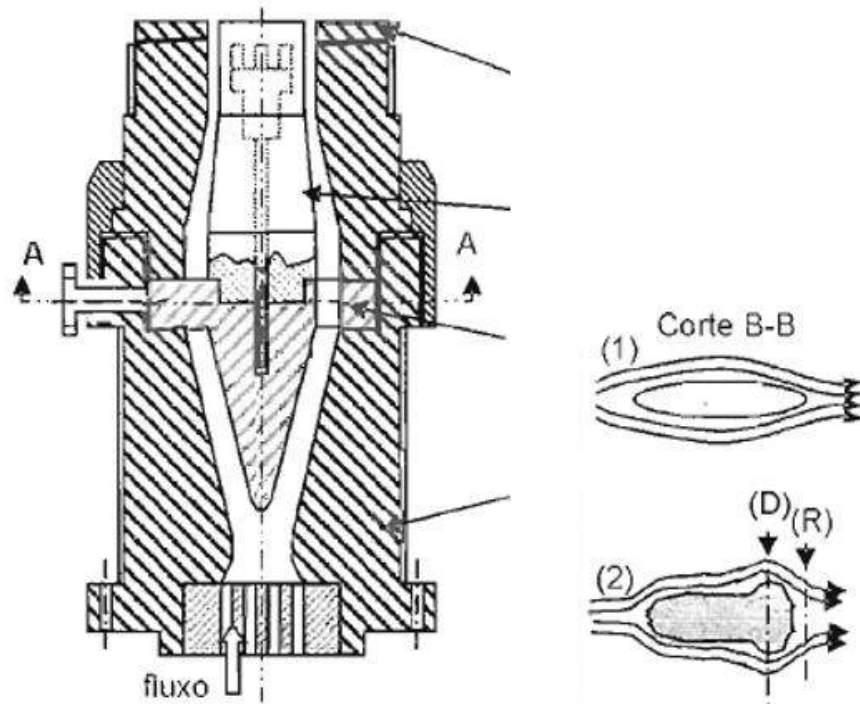


Figura 2-55: Mandril fijado por crucetas [7].

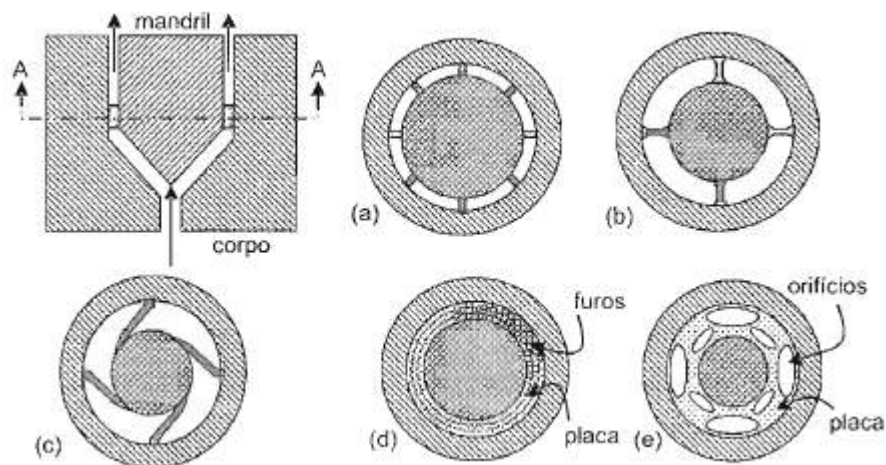


Figura 2-56: Mandril fijado por crucetas [5].

- b) Mandril soportado por cilindro perforado:** En este caso, la fijación se realiza a través de un cilindro perforado, fijado en la base del housing central. La ventaja en este caso es que la mezcla, al pasar por los agujeros, toma otra dirección, mejorando la homogeneidad y la calidad de extrusión. Por su parte, las desventajas se pueden observar en las bajas velocidades de flujo, debido al hecho de tener que cambiar de dirección al pasar por los agujeros del cilindro. Normalmente, los agujeros poseen un diámetro de entre 2 y 5 mm y un largo de entre 3 y 5 mm.

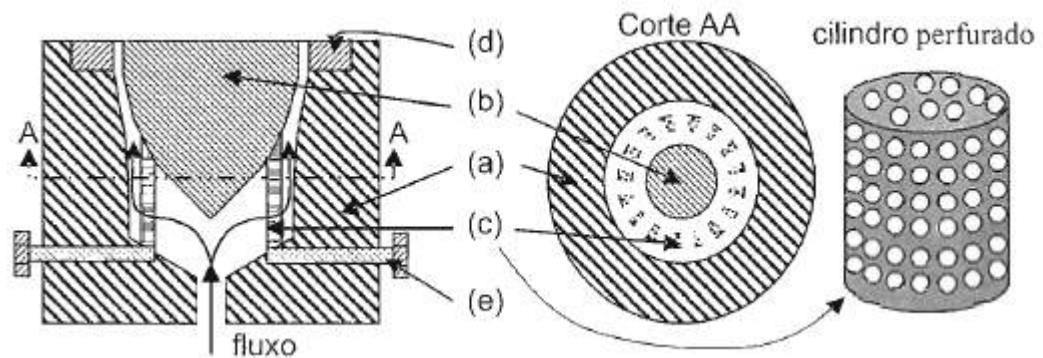


Figura 2-57: Cilindro perforado.

- c) **Mandril fijado directamente en la base del housing:** en este caso, la alimentación del flujo es realizada por el lateral. Para este tipo de mandril, es necesario un balanceamiento del flujo para que la presión sea igual en todos los puntos del canal. Se deben diseñar mandriles con zonas de compresión y relajación debidamente diseñadas, para que la calidad del producto extruido sea la adecuada.

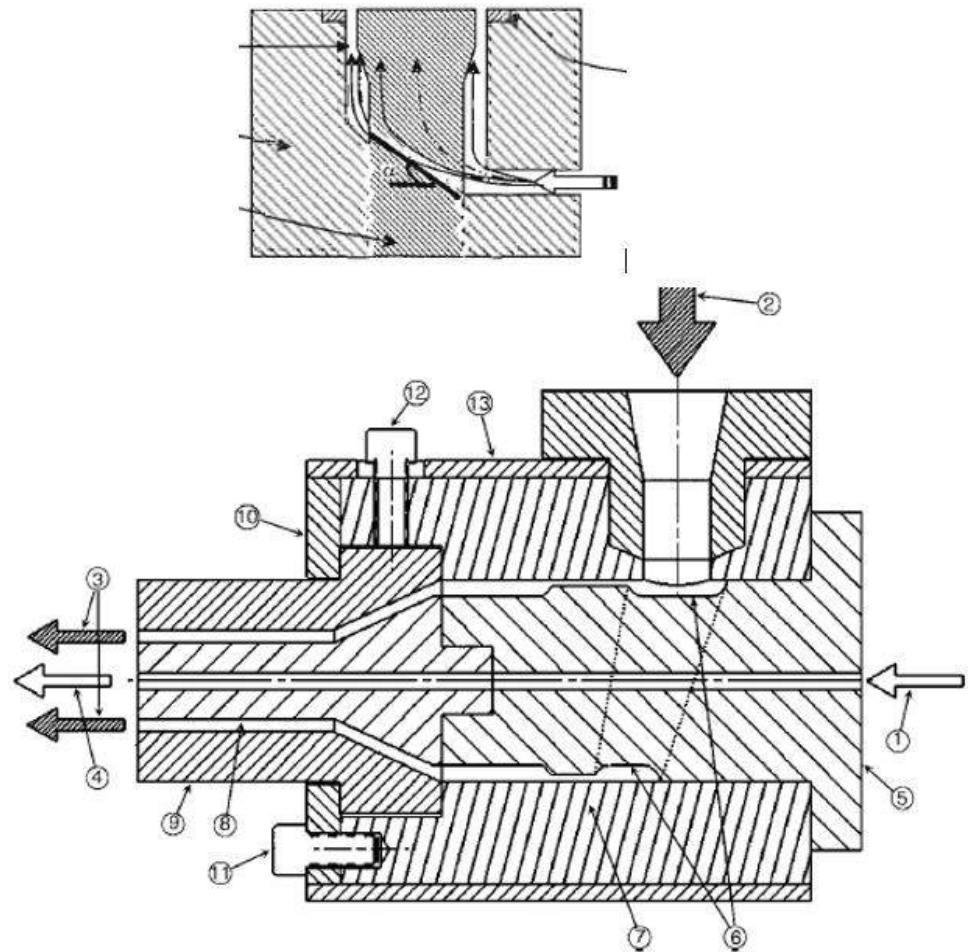


Fig. 4 Schematic of in-line tubing die (A): (1) housing; (2) mandrel (torpedo); (3) die pin (interchangeable); (4) die land (interchangeable); (5) retaining plate; (6) die centering bolt; (7) air hole; (8) mandrel support (spider leg); (9) die flange (mount to extruder with split clamp); (10) heater band; and cross-head tubing (or wire coating) die (B): (1) air or wire conductor inlet; (2) melt inflow (side inlet); (3) melt exit (annulus); (4) air or wire conductor exit; (5) core tube; (6) flow splitter; (7) housing; (8) die pin; (9) die land; (10) retaining plate; (11) retaining ring bolt; (12) die centering bolt; (13) heater band.

Figura 2-58: Mandril fijado en la base del housing [12].

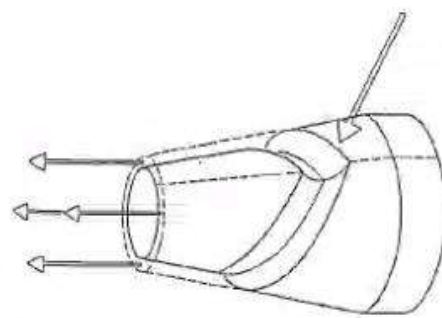


Fig. 5.39 Mandrel of a side-fed die with a coathanger manifold (principle)

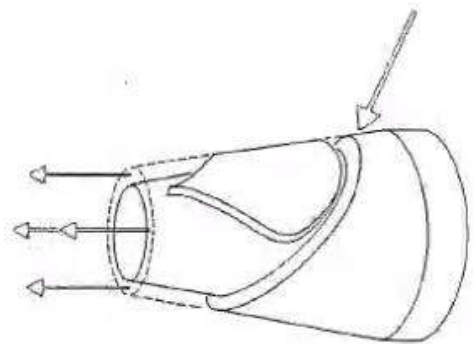


Fig. 5.40 Mandrel of a side-fed die with a heart-shaped manifold (principle)

Figura 2-59: Mandril con forma de corazón [3].

- d) **Mandriles con espirales:** este tipo de cabezales se utiliza para eliminar el defecto geométrico ocasionado al unirse el flujo luego de los cambios de dirección, por ejemplo, al cruzar las crucetas. Al aumentar el recorrido luego de pasar por las crucetas, aumenta el tiempo de residencia para intentar eliminar la línea de unión provocada por la unión del flujo en un punto característico del cabezal. Como desventaja, las presiones aumentan.

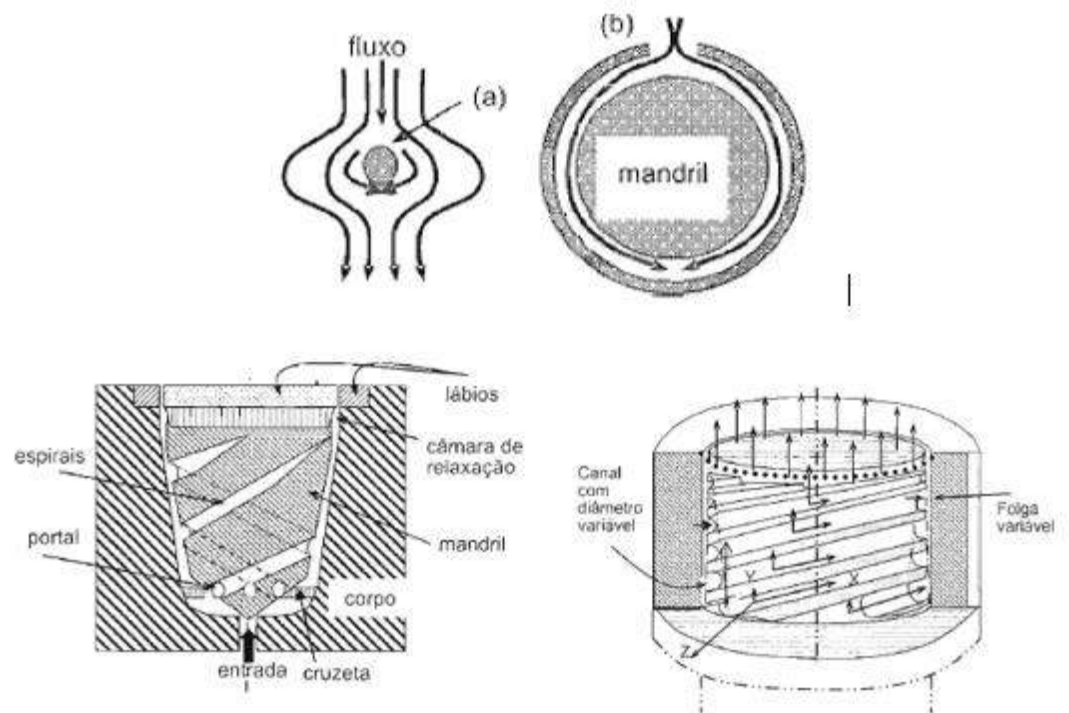


Figura 2-60: Mandril con espirales [5].

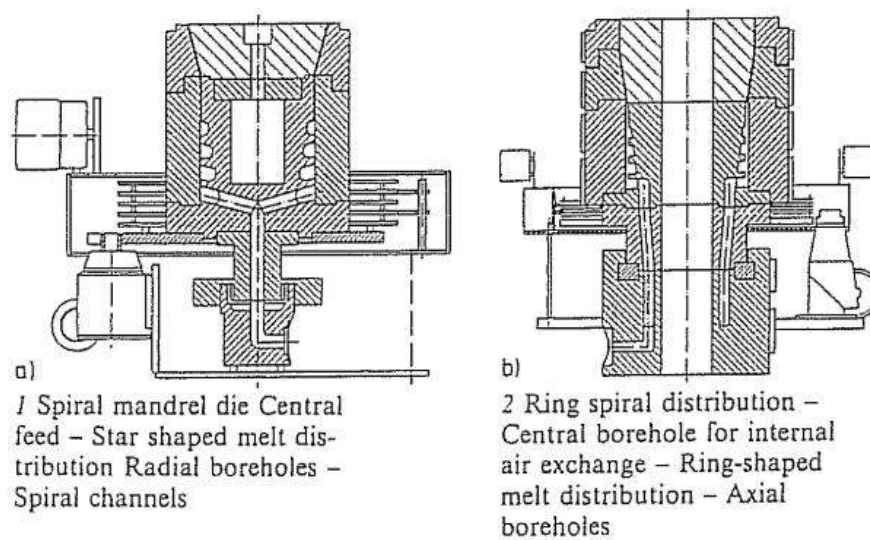


Fig. 5.41 Spiral mandrel dies for blown film extrusion (Reifenhäuser)

Figura 2-61: Mandril con espirales [3].

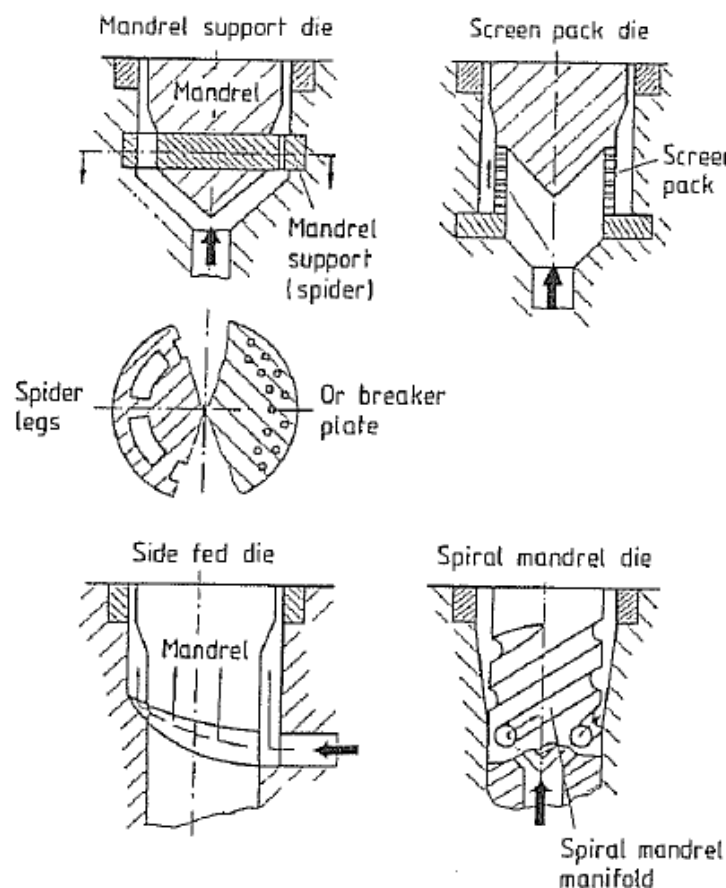


Figura 2-62: Mandril con espirales [3]

Las espirales inducen a un flujo multidireccional del fundido, hasta que llegue a los labios de la matriz. Si el fundido puede avanzar en diferentes direcciones al mismo tiempo, se homogeniza, eliminando la línea de junta del fluido.

- 5- Boquilla y dado de extrusión:** la misma se coloca con las dimensiones características luego del mandril. Sobre la misma, se coloca el dado de extrusión, formando así el canal anular de extrusión.

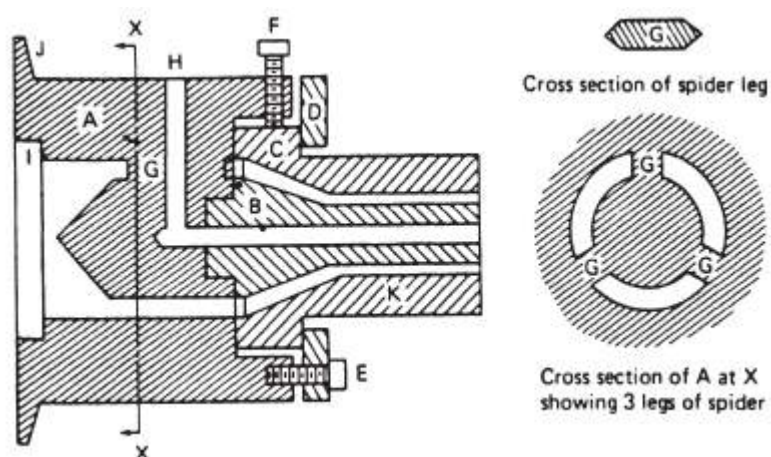


Figura 2-62: Boquilla y dado de extrusión [3].

Generalmente las boquillas suelen tener una regulación, a partir de tornillos, la cual permiten controlar la concentricidad en la extrusión.

Los dados de extrusión suelen sujetarse contra el housing central a partir de una tapa unida a este último mediante bulones.

El largo de la boquilla para el caso de extrusiones anulares se toma en un mínimo de 10 veces el diámetro de extrusión, mientras que el máximo ángulo de salida no debe superar los 30° para que el flujo no cambie las características de homogeneidad y velocidad.

2.5.5 Tipos de recubrimientos

2.5.5.1 Recubrimiento por presión

En este tipo de recubrimiento, el conductor es envuelto por el flujo con una presión ejercida en el cabezal. Este procedimiento es realizado principalmente para manufactura de cables, donde es necesario que el recubrimiento se una con una gran firmeza al alambre.

El resultado es un buen contacto de la mezcla con el alambre, buen control del diámetro exterior y la eliminación del problema de extruir material con capsulas de aire internas, debido al buen contacto del recubrimiento.

2.5.5.2 Recubrimiento tipo tubo

Utilizando este tipo de recubrimiento, la mezcla se extruye sobre el alambre, con una forma determinada. Generalmente es utilizado para dobles recubrimientos, núcleos aislados o recubrimientos para varillas de metal utilizando polipropileno.

La ventaja de este método es que las capas individuales son realmente coaxiales.

En estos casos, es necesario un buen sistema de distribución de la mezcla sobre los conductos anulares del cabezal. Generalmente son utilizados mandriles alimentados lateralmente con el mandril en forma de corazón.

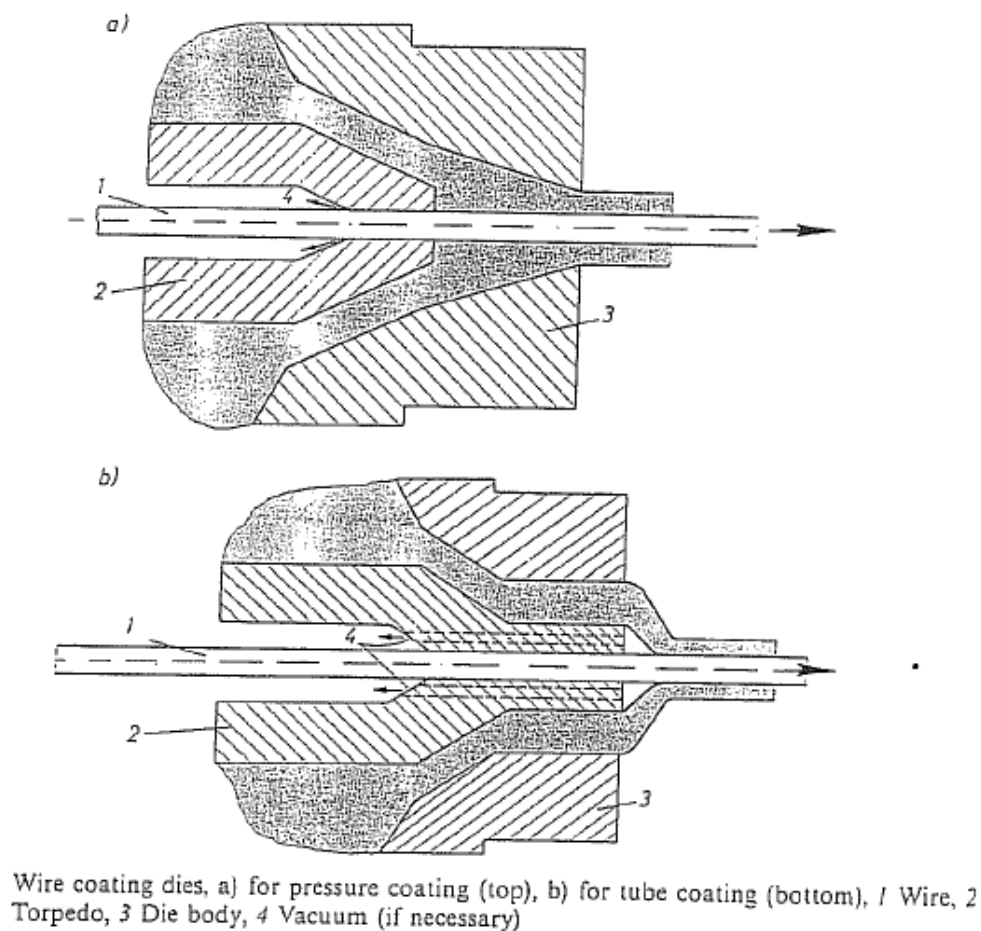


Figura 2-63: Tipos de recubrimientos [3].

Existen cabezales con centradores del alambre, permitiendo extruir mayores espesores. Estos centradores son generalmente de diamante, silicato de aluminio o aceros aleados muy resistentes al desgaste.

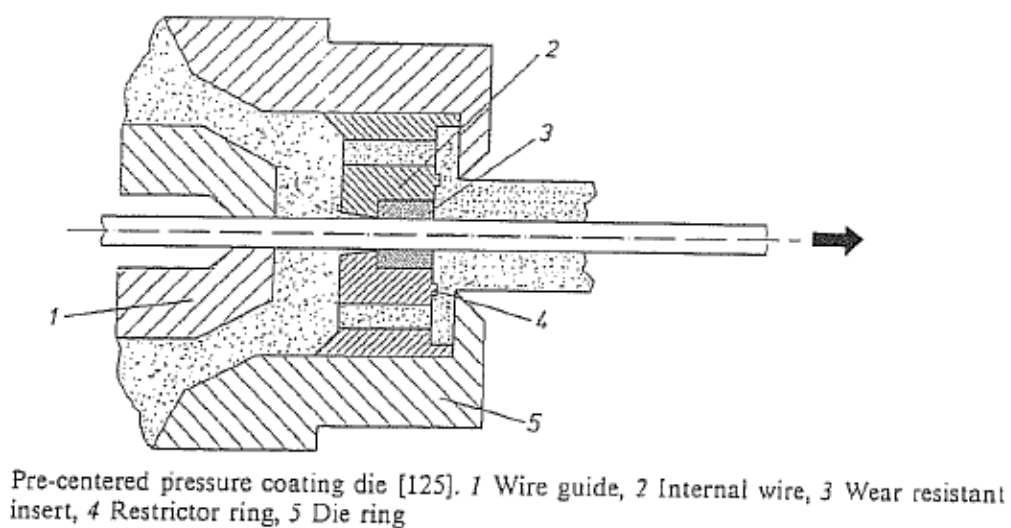


Figura 2-64: Tipos de recubrimientos [3].

Utilizando este sistema, no es necesario ningún otro tipo de dispositivo centrador. También, posee la ventaja de que el conductor (alambre) se encuentra previamente rodeado de una capa de mezcla previo a pasar por el centrador. De esta manera, se aumenta la adhesión ente el conductor y el polímero.

El diámetro del anillo exterior del cabezal permite extruir espesores de mayor amplitud, además de afectar a la calidad de la extrusión.

Al aumentar la longitud de salida de la boquilla, mejora la calidad del extruido debido a una mejor homogeneización de la mezcla. Aunque, si el cabezal es muy largo, los tiempos de residencia son muy grandes. Si el largo del cabezal es muy corto, el efecto es adverso, debido a que la mezcla, al salir de la zona del tornillo, no posee el tiempo de residencia necesario para poder realizar una extrusión de calidad.

2.5.6 Resistencias eléctricas

Una resistencia eléctrica se logra con una oposición que encuentra la corriente a su paso por un circuito eléctrico cerrado, atenuando o frenando el libre flujo de circulación de las cargas eléctricas o electrones. Cuanto mayor sea la resistencia, mayor energía en forma de calor se generará, provocando un aumento de la temperatura.

El calentamiento del cilindro se realiza por lo general por sistemas de transferencia de calor. Este calentamiento puede realizarse mediante resistencias eléctricas circulares localizadas en las zonas adecuadas del cilindro.

Para la selección de las resistencias eléctricas se debe tener en cuenta:

- Temperatura requerida por el sistema (fluido a calentar)
- Propiedades mecánicas del material
- Material del cilindro
- Material de las abrazaderas



Figura 2-65: Ejemplos de resistencias eléctricas.



Figura 2-66: Ejemplo de colocación de resistencias eléctricas en una extrusora.

Los calentadores pueden colocarse en todo el tornillo, como se ve en la anterior imagen, o solo en sectores deseados, como en la zona de transición donde se requiere calentar el material para generar un estado pastoso o fluido.

2.3.7 Termopares

Un termopar es un sensor utilizado para medir la temperatura de un determinado fluido. Se compone principalmente de 2 materiales metálicos unidos en un extremo y reparados en el otro. Los mismos son contruidos de diferentes materiales metálicos o aleaciones que permiten una amplia gama de aplicaciones. Los tipos más comunes son J, K, T, E, entre los principales, siendo que los tipos varían según a temperatura de utilización que poseen.



Figura 2-67: Termopares.

2.6 Reología

La Reología es la ciencia de la deformación y el flujo de materiales. Todos los materiales pueden obtenerse en un flujo, con el tiempo suficiente. Para los polímeros, las constantes de tiempo para el flujo son del mismo orden de magnitud que sus tiempos para la extrusión, moldeo por inyección y moldeo por soplado de procesamiento.

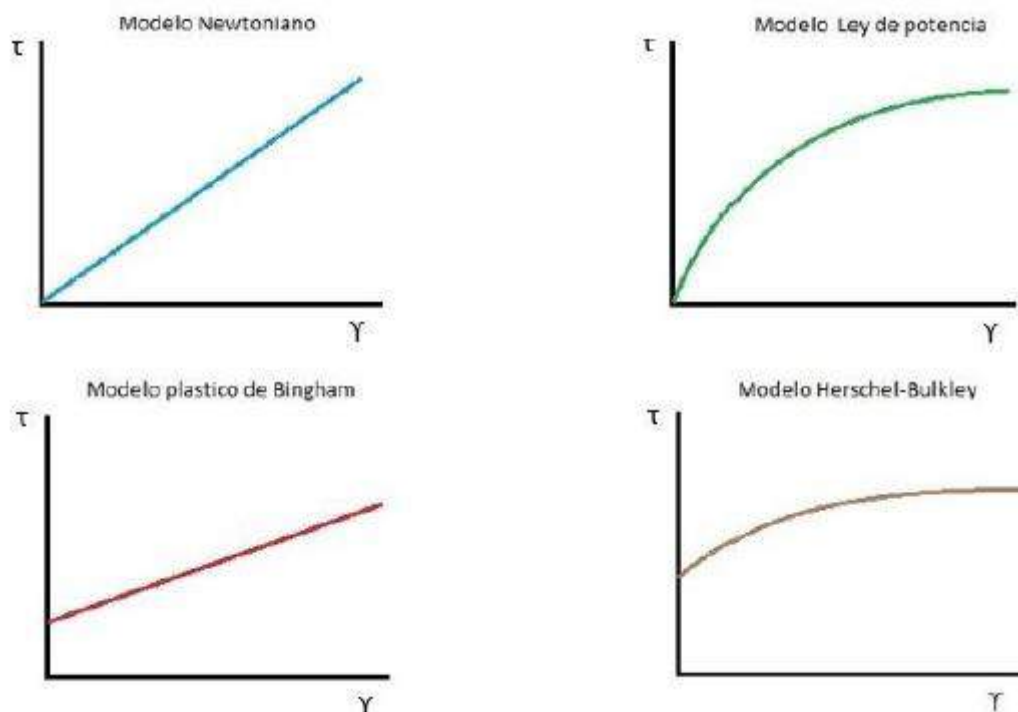


Figura 2-68: Reología.

En un muy corto tiempo de procesamiento, el polímero puede comportarse como un sólido, mientras que en largos tiempos de procesamiento el material puede comportarse como un fluido. Esta naturaleza se conoce como comportamiento viscoelástico.

La mayoría de los procesos de polímero están dominados por la velocidad de deformación de cizallamiento. Por lo tanto, la viscosidad utilizada para caracterizar el fluido se basa en dispositivos para la medición de deformación por cizallamiento.

Existen varios modelos que se encuentran siendo utilizados para representar la dependencia de la temperatura y la velocidad de deformación respecto a la viscosidad.

2.6.1 Viscosidad

La viscosidad es la propiedad que determina que un fluido fluya. Se define como la razón entre el esfuerzo cortante y la velocidad de cizalla durante el flujo. Por su parte, el esfuerzo cortante es la fuerza por fricción que el fluido ejerce por unidad de área, y la velocidad de cizalla es el gradiente de velocidad perpendicular a la dirección del flujo.

El coeficiente de viscosidad puede expresarse como:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} [Pa.s] \quad (2.1)$$

2.6.2 Esfuerzo cortante

Se realiza la suposición de que un fluido fluye a través del espacio entre 2 placas paralelas separadas por una distancia estacionaria. Al movimiento de la placa superior se le opone una fuerza F que resulta de la acción de la viscosidad cortante del fluido. Dividiendo esta fuerza con respecto al área de la placa, es posible obtener el esfuerzo cortante, como se muestra en la siguiente figura.

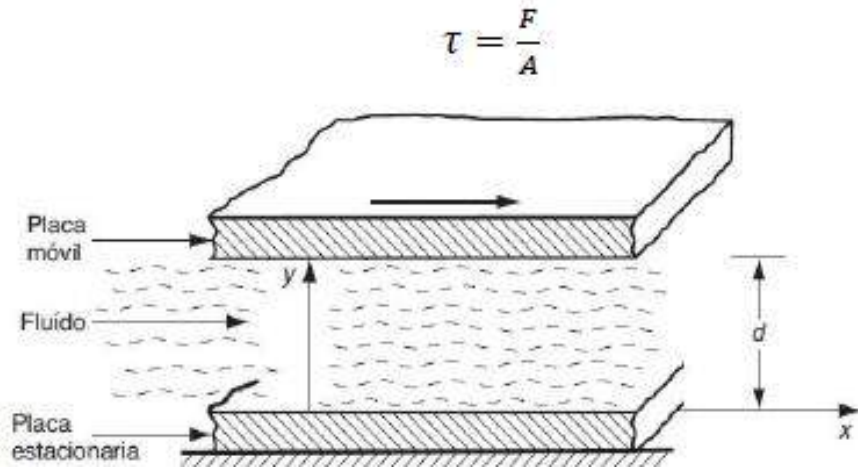


Figura 2-69: Esfuerzo cortante.

2.6.3 Viscosidad efectiva

La viscosidad efectiva μ_{ef} se determina en función de la velocidad de cortadura, por medio de diagrama preparados para los diferentes materiales, en dependencia directa de la temperatura. La viscosidad de los materiales termoplásticos depende de la temperatura y del peso molecular, decreciendo al calentar el material y al disminuir el peso molecular. Entonces, se puede decir que la viscosidad efectiva es un parámetro de viscosidad que depende de la temperatura y propiedades específicas del material, siendo éste un parámetro importante para el diseño de la extrusión, ya que del mismo van a depender la magnitud de los esfuerzos generados y a potencia a emplear. A continuación, se puede observar, a modo de ejemplo, una gráfica que muestra la relación entre la velocidad de cortadura [1/seg] y la viscosidad efectiva, para diferentes temperaturas de trabajo para el material polietileno.

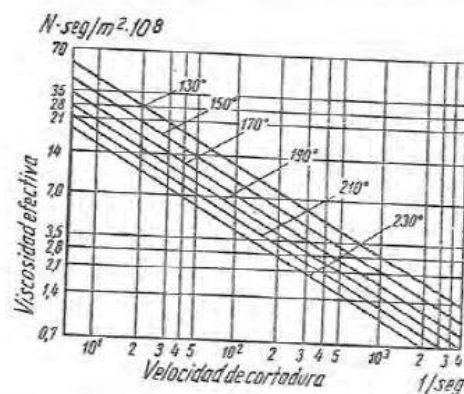


Figura 2-70: Viscosidad efectiva.

Cuando se carece de las relaciones y gráfico para los materiales, es posible calcular la viscosidad efectiva mediante la siguiente fórmula, según el investigador Savgorodny:

$$\mu_{ef} = \frac{\mu_e R^{1-v}}{V_m^{1-v} \left(\frac{1}{v} + 3 \right)^{1-v}} \quad (2.2)$$

Donde:

μ_e es la viscosidad a la temperatura de extrusión;

R es el radio del canal;

V_m es la velocidad media de extrusión;

v es la constante reológica del material

2.7 Modelos de Flujo

2.7.1 Fluidos Newtonianos y No Newtonianos

Un fluido newtoniano es un fluido cuya viscosidad puede considerarse constante. Es decir, la curva Esfuerzo cortante – Velocidad de deformación, es constante.

En contraposición, un fluido No Newtoniano es aquel que presenta una viscosidad variable con respecto a las velocidades de cizalla. Cuando la velocidad de cizalla aumenta y la viscosidad del fluido disminuye, se puede decir que el fluido es No Newtoniano. En la siguiente figura se expresa lo anteriormente descrito:

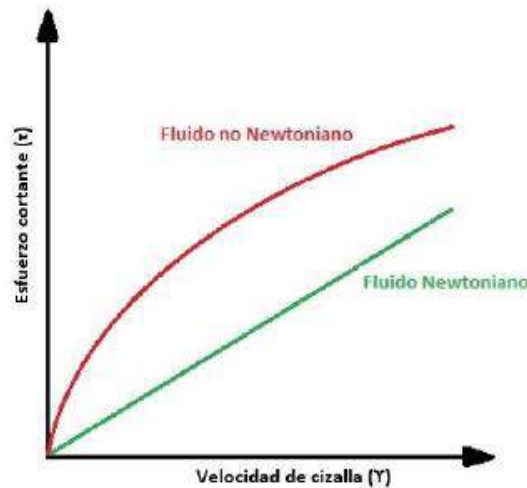


Figura 2-71: Tipos de fluidos.

Como se puede observar, un fluido no newtoniano posee una curva no lineal. Es decir, la viscosidad aparente que presentan dependen de parámetros como la temperatura y la presión, además de las geometrías de flujo, velocidad de cizallamiento, etc. Dentro de los fluidos no newtonianos se pueden encontrar principalmente 3 tipos de clases: los fluidos para el que la velocidad de cizalla en cualquier momento se determina sólo por el valor del esfuerzo cortante en el punto en ese instante (independientes del tiempo, puramente viscosos o inelásticos), fluidos para los cuales la relación entre la velocidad de cizalla y el esfuerzo cortante depende también de la duración de cizallamiento (dependientes del tiempo) y por último, fluidos que presentan combinación de características y muestran una recuperación elástica parcial (fluidos visco elásticos).

2.7.2 Ley de Potencia

La ley de potencia es un modelo simple para la representación de una curva de viscosidad vs velocidad de cizalla para el comportamiento de un plástico fundido. Debido a las características de un fluido no newtoniano, es importante conocer la magnitud del cambio que se producirá en un polímero particular.

La viscosidad a velocidades de cizalla muy bajas es independiente de las velocidades de cizalla. Por lo tanto, el fluido se comporta como un fluido newtoniano a velocidades de cizalla muy bajas. Este rango de comportamiento es posible de obtener, debido a que a altas velocidades de cizalla los efectos de la presión y la temperatura se vuelven muy pronunciados.

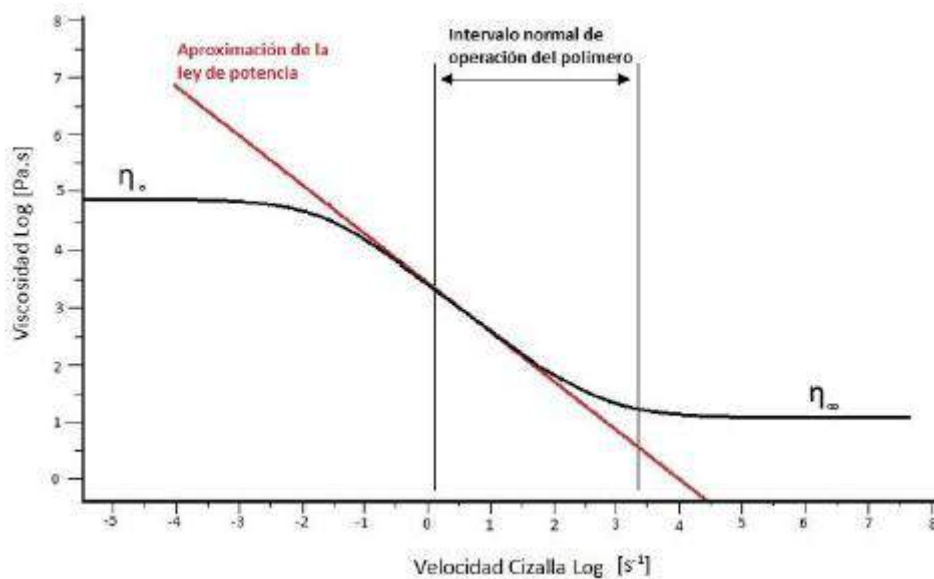


Figura 2-72: Ley de potencia.

El rango de velocidades de cizalla encontradas en la mayoría de las operaciones de procesamiento de polímeros es de aproximadamente 1 a 10.000 1/s. En este rango, la relación entre la viscosidad y la velocidad de cizalla puede considerarse lineal para este tipo de fluidos. En este rango, las variables pueden representarse mediante la ecuación

$$\eta = m(T^{\circ}C)\gamma^{n-1}$$

Figura 2-73: Ley de potencia para un fluido, siendo m = índice de consistencia y n = exponente de la ley de potencia.

Así, para diferentes fluidos se puede representar un rango de velocidades para cada tipo de procesamiento, según el investigador Savgorodny [4], como sigue:

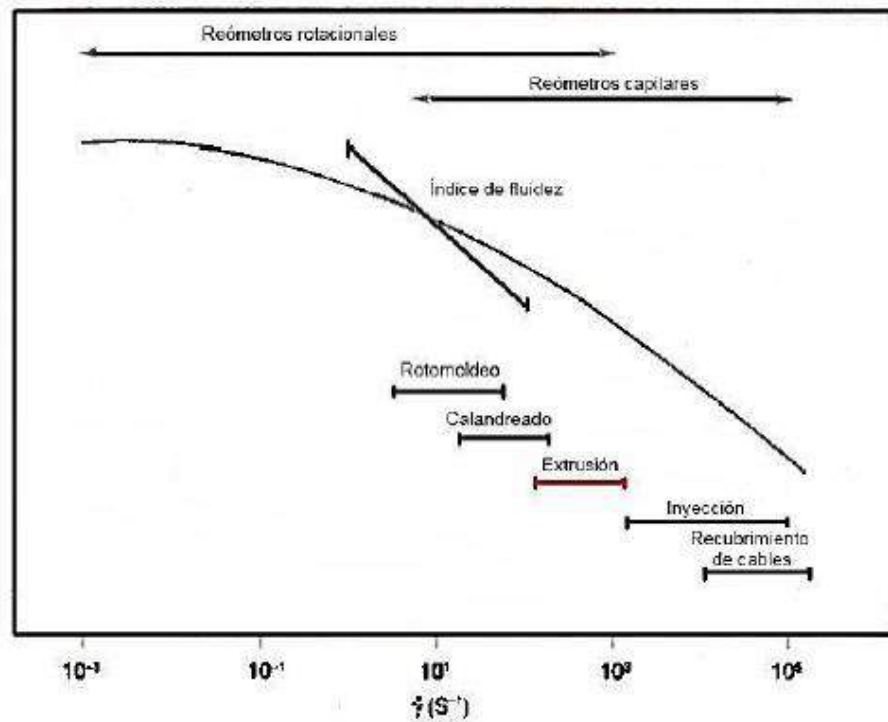


Figura 2-74: Rango de velocidades de corte para diferentes tipos de procesos de fluidos.

Como se puede observar, para procesos de extrusión, generalmente se utilizan rangos de 10^2 a 10^3 [1/s].

A modo de ejemplo, en la siguiente figura se puede observar viscosidades vs velocidades de cizalla para diferentes materiales

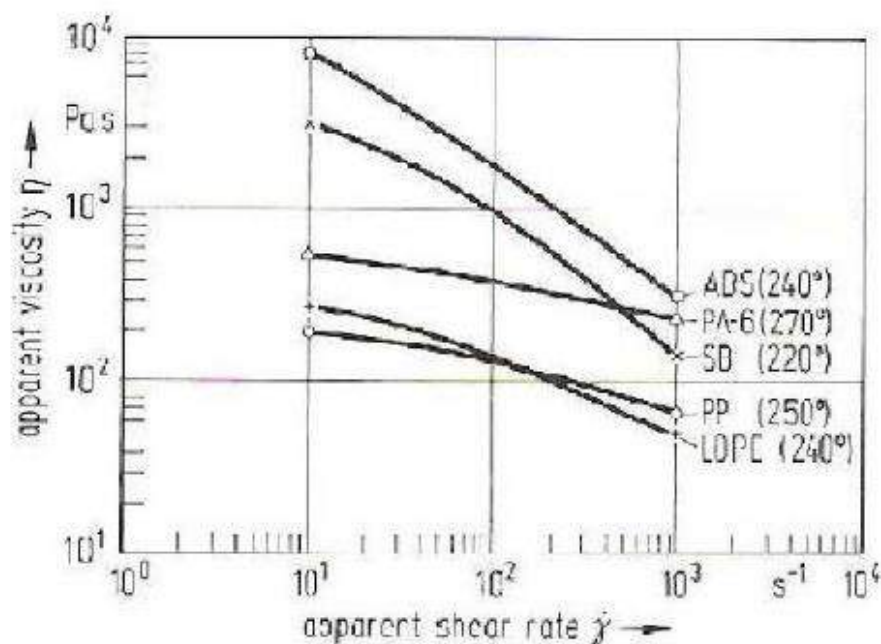


Figura 2-74: Viscosidad efectiva vs velocidad de cizalla para diferentes materiales

Es posible observar como en el rango de 10^2 a 10^3 [1/s] las viscosidades describen una línea aproximadamente recta, pudiendo considerarse como fluidos newtonianos. También es posible observar, como referencia, que las viscosidades se encuentran en un rango entre 10^2 y 10^3 (en general) para ese rango de velocidades de cizalla.

2.7.3 Ecuaciones de caudal

El caudal de material que circula por el tornillo es posible de obtener como el producto de la velocidad del material por la sección del tornillo. Se puede a partir de la ecuación de velocidad anteriormente lograda, integrando el producto de la velocidad por el ancho del canal entre los límites de $y=0$ e $y=h$.

$$Q = \int_0^h w.v.dy = \int_0^h \frac{w.V.y}{h} dy + \int_0^h \frac{w.y.(y-h)}{2\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right) dy \quad (2.2)$$

$$Q = \frac{wVh}{2} - \frac{wh^3}{12\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right) \quad (2.3)$$

En esta última ecuación se pueden observar 2 términos:

- **Flujo de arrastre:** $Q_d = \frac{wVh}{2} \quad (2.4)$

- **Flujo de retroceso:** $Q_p = \frac{wh^3}{12\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right) \quad (2.5)$

y como anteriormente se mencionó, el flujo de pérdidas generalmente es posible despreciarlo debido a que su magnitud es muy baja con respecto a las demás.

Ahora, si se quiere escribir la anterior ecuación de caudal de flujo a través del tornillo, en función de las dimensiones del tornillo, se puede continuar de la siguiente manera.

Se representa a continuación una representación del tornillo desenrollado y cortado a lo largo de su eje:

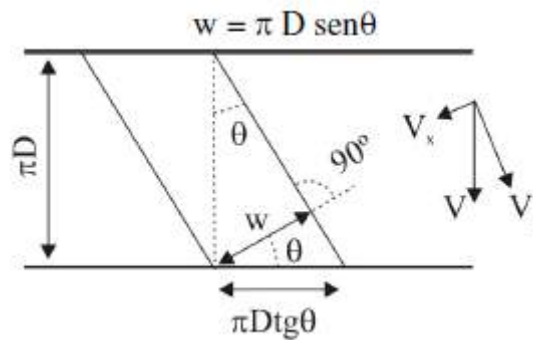


Figura 2-75: Representación del tornillo desenrollado con sus parámetros

Si V es la velocidad con la que se mueve el cilindro sobre el tornillo $V = \pi D N$, y está dirigida formando un ángulo θ con respecto al filete del tornillo, la misma posee 2 componentes V_z y V_x , paralelas al eje Z y al eje X respectivamente.

$$V_z = V \cdot \cos \theta = \pi \cdot D \cdot N \cdot \cos \theta \quad (2.6)$$

$$V_x = V \cdot \sin \theta = \pi \cdot D \cdot N \cdot \sin \theta \quad (2.7)$$

La componente V_z es la responsable del movimiento del fluido dentro del canal. La componente X causa un movimiento circulatorio importante para mejorar el mezclado y la transmisión de calor, pero no para la capacidad de transporte del tornillo. Entonces, para calcular la capacidad de transporte sólo es necesario tener en cuenta el caudal de arrastre.

Entonces, substituyendo los valores de w y V ($V=V_z$) en el primer término de la ecuación de caudal:

$$Q_d = \frac{wVh}{2} \quad (2.8)$$

$$Q_d = \frac{wVh}{2} = \frac{(\pi.D.\text{sen}\theta).(\pi.D.\cos\theta.N).h}{2} = \frac{\pi^2.D^2.(\text{sen}\theta.\cos\theta).h.N}{2} \quad (2.9)$$

Por su parte, el segundo término de la ecuación de caudal, puede expresarse en función de las dimensiones del tornillo, teniendo en cuenta que, si se desarrolla completamente, el tornillo se puede escribir:

$$\frac{L}{Z} = \text{sen}\theta \quad (2.10)$$

Y tomando diferenciales

$$dZ = \frac{dL}{\text{sen}\theta} \quad (2.11)$$

Donde L corresponde a la longitud del cilindro y Z a la longitud total del canal del

tornillo una vez desarrollado, donde a lo largo existe un gradiente de presión $\left(\frac{dP}{dZ}\right)$. De este modo, se puede escribir el segundo término de la ecuación como:

$$Q_p = \frac{wh^3}{12\eta} \left(\frac{dP}{dZ}\right) = \frac{\pi.D.\text{sen}\theta.h^3}{12\eta} \left(\frac{dP}{dL}\right) \text{sen}\theta = \frac{\pi.D.\text{sen}^2\theta.h^3}{12\eta} \left(\frac{dP}{dL}\right) \quad (2.12)$$

Y, si se considera la caída de presión a lo largo del tornillo constante y tomando incrementos:

$$\frac{dP}{dL} = \text{cte} = \frac{\Delta P}{L} \quad (2.13)$$

Se puede escribir el caudal total como

$$Q = \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot (\sin\theta \cdot \cos\theta) \cdot h \cdot N}{2} - \frac{\pi \cdot D \cdot \sin^2\theta \cdot h^3}{12\eta} \frac{\Delta P}{L} \quad (2.14)$$

A partir de esta ecuación es posible construir una gráfica de operación del tornillo durante su funcionamiento:

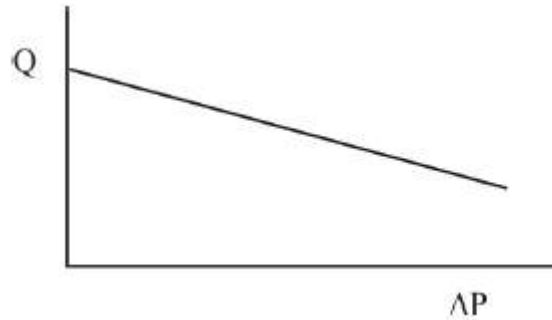


Figura 2-76: Grafica de operación del tornillo.

Cómo es posible observar, el caudal disminuye a medida que aumenta la caída de presión en la máquina. En las extrusoras, se quiere que la pendiente de la recta sea la menor posible, de modo que pequeñas fluctuaciones en la presión impuesta por la boquilla no afecten demasiado al caudal extruido.

Cuando hay acumulación de presión en el extremo de la extrusora, cualquier flujo es debido al arrastre y se puede obtener el máximo caudal de flujo $Q_{\max}$. Es decir, en la ecuación de caudal sólo aportará el termino debido al flujo por arrastre.

$$Q = Q_{\max} = \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot (\sin\theta \cdot \cos\theta) \cdot h \cdot N}{2} \quad (2.15)$$

Por otra parte, cuando existe una gran caída de presión en la boquilla de la extrusora y el caudal se hace aproximadamente 0 (cuando por ejemplo la boquilla se encuentra tapada o el caudal depende de la inserción de algún elemento externo), entonces se obtiene la ecuación de presión máxima, igualando el flujo de arrastre y el flujo de retroceso de la siguiente manera:

$$\frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot (\sin\theta \cdot \cos\theta) \cdot h \cdot N}{2} = \frac{\pi \cdot D \cdot \sin^2\theta \cdot h^3}{12\eta} \frac{P}{L} \quad (2.16)$$

Y despejando la presión, la cual es máxima:

$$P = P_{\max} = \frac{6 \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot N \cdot \eta}{h^2 \cdot \tan \theta} \quad (2.17)$$

Ahora bien, para poder expresar el caudal extruido de una manera más sencilla, y además teniendo en cuenta los factores que implican un cabezal de extrusora con diferentes geometrías, las cuales causan diferentes efectos y pérdidas de presión en el funcionamiento, el investigador Savgorodny expresa la siguiente fórmula:

$$Q = \left(\frac{\alpha k}{k + \beta + \gamma} \right) \eta \quad (2.18)$$

Donde:

- α Es el caudal unitario del flujo de arrastre. El mismo puede determinarse de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{\pi \cdot m \cdot D \cdot h_1 \cdot \left(\frac{t}{m} - e \right) \cos^2 \varphi}{2} \quad [\text{cm}^3] \quad (2.19)$$

Siendo:

- D el diámetro del tornillo
- h_1 la profundidad del canal en la zona de dosificación
- φ el ángulo de la hélice
- m el número de canales del tornillo
- e la anchura del filete del tornillo
- β Es el caudal unitario de flujo de retroceso (Q_p). Se puede calcular de la siguiente manera:

$$\beta = \frac{m \cdot h_1^3 \cdot \left(\frac{t}{m} - e \right) \sin \varphi \cos^2 \varphi}{12 \cdot L} \quad [\text{cm}^3] \quad (2.20)$$

Siendo:

- L: longitud del tornillo
- γ Es el caudal unitario de flujo de filtración. Generalmente no es tenido en cuenta, pero el mismo es calculado de la siguiente manera:

$$\gamma = \frac{\pi^3 \cdot D^3 \cdot \delta^3 \cdot \tan \varphi}{10 \cdot e \cdot L} \quad [\text{cm}^3] \quad (2.21)$$

Siendo:

- δ la holgura entre la cresta del filete y el cilindro
- K la constante total del cabezal de la máquina. Para determinar esta constante, la cual es un coeficiente de la forma geométrica del cabezal, zona de dosificación del fluido), el cabezal se divide convencionalmente en sucesivas zonas de diferente configuración, estableciendo para cada una de ellas la constante K. Las fórmulas de K para cada geometría se pueden ver en Anexo A: Memoria de cálculos

2.8 Influencias de variables

El caudal extruido depende de diversas variables que se pueden agrupar del siguiente modo:

- Dimensiones del tornillo: D, L, h, Θ
- Tipo de material a extruir: η
- Condiciones del proceso: N, T
- Restricción impuesta por la boquilla: ΔP

A continuación, se detallará cada una de las anteriores variables y su influencia en el funcionamiento del sistema.

2.8.1 Efecto de las dimensiones del tornillo

La longitud del tornillo no afecta al flujo de arrastre, pero sí afecta al flujo de retroceso. El aumento de la longitud del tornillo se refleja en la representación de Q frente a ΔP

como una disminución en la pendiente de la línea operativa del tornillo, tal como se puede observar en la fórmula de caudal (1) si se reemplazan los valores.

Otra variable que tiene gran importancia es la profundidad del canal, h . Esta afecta tanto al flujo de arrastre como al flujo de retroceso. Un aumento de la profundidad del canal supone un aumento de ambos tipos de flujo. Sin embargo, el efecto es más pronunciado con el aumento del flujo de retroceso que de arrastre, según la fórmula de caudal observada.

La figura a continuación muestra la influencia de la profundidad del canal con respecto a la longitud del tornillo en la producción de caudal del sistema.

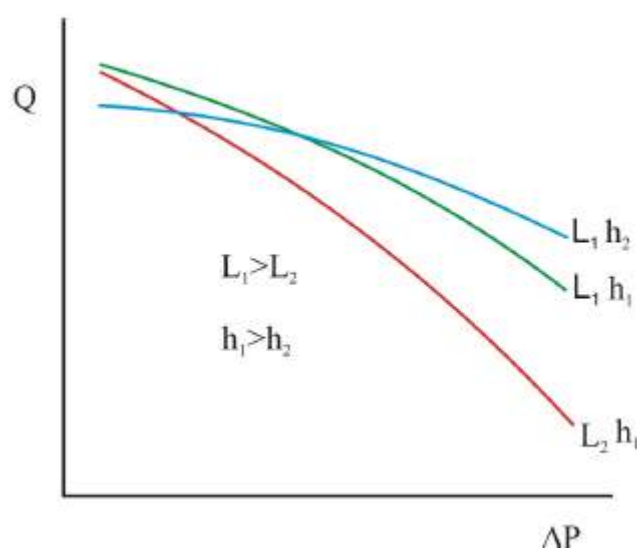


Figura 2-78: Efecto de la profundidad del canal con respecto a la longitud de tornillo en el caudal.

Estos efectos son considerados en un sistema donde $\Delta P > 0$, que es un caso de funcionamiento normal de un tornillo, donde la presión en el ingreso del material (presión atmosférica) es menor que la presión que se genera en la zona de dosificación, debido al plato rompedor, los cambios de sección y la boquilla de salida.

Por su parte, cuanto mayor sea el diámetro del tornillo, mayor será el caudal de material que la máquina es capaz de extruir. Con respecto al ángulo del filete, podemos decir que mientras mayor sea el mismo, la longitud de fusión decrece. En la práctica, se suelen utilizar ángulos de entre 15° y 30° .

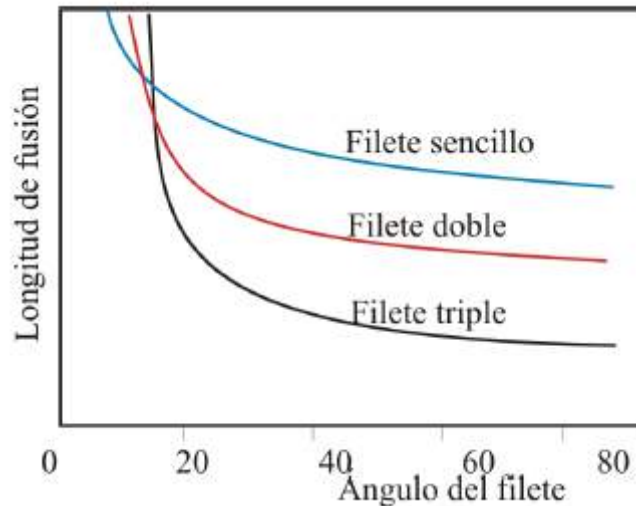


Figura 2-79: Influencia del ángulo de filete en el sistema

2.8.2 Efecto de la viscosidad del material a extruir

La ecuación de caudal (1) expresa que un incremento en la viscosidad supone una disminución en la pendiente de la recta de Q vs P . Sin embargo, una mayor viscosidad del polímero supone también un mayor consumo energético. La disminución de la viscosidad puede lograrse de varias maneras:

- Aumentando a temperatura de la boquilla o el perfil de temperatura a lo largo del cilindro
- Utilizando un material de menor peso molecular
- Utilizando aditivos tales como lubricantes internos o plastificantes.

Por su parte, la utilización de este tipo de soluciones puede traer un aumento en los costos, tiempo de enfriamiento, propiedades del producto, entre otras.

2.8.3 Efecto de las condiciones de operación

Al aumentar el número de vueltas N , aumenta el flujo de arrastre, y por su parte, según la ecuación de caudal (1), el flujo de retroceso no se ve afectado, por lo que se obtiene un mayor caudal.

Sin embargo, la experiencia indica que al aumentar el número de vueltas en realidad aumenta la cizalla sobre el material, por lo que disminuye su viscosidad, y en consecuencia, aumenta el flujo de retroceso Q_p , aumentando también la pendiente de las rectas operativas del tornillo.

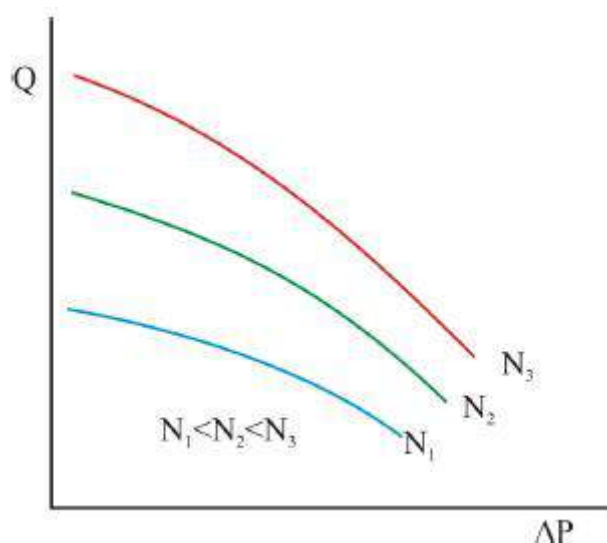


Figura 2-80: Influencia de N en la producción del caudal vs presión.

2.8.4 Efecto de la restricción de la boquilla

El flujo del material en la boquilla es debido exclusivamente a la diferencia de presión que se genera entre el punto por donde el material entra a la boquilla y la salida, donde la presión es atmosférica. En la boquilla, la diferencia de presión es negativa, debido a que la presión en el ingreso es mayor que a la salida, por lo que el flujo de retroceso es en dirección y sentido del flujo de arrastre. En general, la cantidad de material que fluye a través de una boquilla es posible calcularla como:

$$Q = k \frac{\Delta P}{\eta} \quad (2.22)$$

Donde k es una constante que depende del orificio de salida de la boquilla. Cuanto mayor sea el orificio de salida de la boquilla, mayor será el caudal extruido para una diferencia de presión dada.

2.9 Características del material a extruir

El material a extruir será una mezcla entre polvo rutílico para electrodos junto con el polímero Polipropileno que será utilizado como aglomerante de la mezcla, en lugar de los silicatos de sodio y potasio que se utilizan en los procesos convencionales.

La mezcla entre el polvo de rutilo para electrodos y el polímero debe ser de tal proporción que proporcione una homogeneización que permita, durante el proceso de extrusión (provocando el calentamiento de la mezcla), un producto que será el

revestimiento a colocar sobre el alma del electrodo, de modo que permita que el mismo sea maleable y flexible a temperatura ambiente.

Debido al objetivo de querer lograr un electrodo que sea maleable y flexible a temperaturas ambientes, se elige la opción de utilizar Polipropileno, el cual posee características que permiten esas condiciones.

2.9.1 Polvo de electrodo rutílico E6013

Las propiedades de composición químicas del polvo rutílico para electrodos son las siguientes:

Table 4.3 Tentative/typical compositions of electrode flux coatings

<i>Flux Ingredients</i>	<i>AWS E 6010 (wt.%)</i>	<i>AWS E 6013 (wt.%)</i>	<i>AWS E 7018 (wt.%)</i>
Cellulose	25–40	3–5	—
Calcium carbonate, CaCO_3	—	—	15–30
Limestone	—	5–10	—
Fluorspar, CaF_2	10–20	—	15–30
Titanium dioxide (rutile)	—	50–60	0–5
Potassium titanate	—	—	0–5
Feldspar, silica, quartz, mica	10–20	5–10	0–5
Asbestos	—	—	—
Iron powder	—	—	25–40
Ferrosilicon	5–10	2–5	5–10
LC ferro-manganese	20–30	3–5	2–6
Sodium silicate and	—	10–25	0–5
Potassium silicate, etc. (Binder)	—	—	10–20
Colouring agent (TiO_2 , others), etc.	1–2	1–2	1–2

Figura 2-81: Composición química del electrodo rutílico E6013

A continuación, se puede observar el contenido de 10 Kg de polvo de electrodo rutílico de la empresa ESAB.



Figura 2-82: Polvo para recubrimiento de electrodo rutílico E6013 marca ESAB

2.9.2 Polipropileno

El polipropileno (PP) es el polímero termoplástico, parcialmente cristalino, que se obtiene de la polimerización del propileno (o propeno). Pertenece al grupo de las poliolefinas y es utilizado en una amplia variedad de aplicaciones que incluyen empaques para alimentos, tejidos, equipo de laboratorio, componentes automotrices

y películas transparentes. A temperaturas normales no es susceptible a fisuras, pero a temperaturas inferiores a 0°C se presenta una fragilización.

La fórmula estructural del polipropileno es la siguiente:

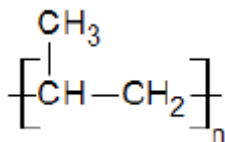


Figura 2-83: Fórmula estructural del PP

Es altamente neutro a ácidos, bases y solventes químicamente agresivos. Por otro lado, no es resistente a líquidos no polares, por ejemplo, benceno, cloruro de metilo y tetracloruro de carbono. Otra propiedad del polipropileno es su baja permeabilidad al vapor de agua. Además de buenos parámetros de aislamiento, este material también se caracteriza por una alta permeabilidad al aire y falta de absorción de agua. Como resultado, los botes, botellas, maletas y varios otros productos producidos a partir de ellos exhiben una resistencia óptima a la humedad. El polipropileno también es inodoro y relativamente fácil de procesar. Especialmente las propiedades termoplásticas del PP lo convierten en un material de elección para fabricar productos de diversas formas y tamaños.

Algunas propiedades del Polipropileno:

- Tiene naturaleza apolar, y por esto posee gran resistencia a agentes químicos. Es decir, se dificulta la interacción directa de este polímero con otros químicos. (ej. Ácidos)
- Presenta poca absorción de agua, por lo tanto, no presenta mucha humedad ya que tiene un bajo coeficiente de absorción de humedad (0.02 kg/m². h0.5)
- El polipropileno tiene una buena resistencia química pero una resistencia débil a los rayos UV, generando degradación. La energía UV absorbida por los plásticos puede excitar a los fotones, que entonces crean radicales libres. Mientras que muchos plásticos puros no pueden absorber la radiación UV, la presencia de residuos de un catalizador y otras impurezas a menudo actúan como receptores y causan la degradación (aspecto calcáreo y cambio de color)
- El PP es resistente a disolventes orgánicos (ej. Cloformo, acetona, tetrahidrofurano)

- El PP es insoluble en al agua.

Table 3.1 Melt processing temperature for TPs

<i>Material</i>	<i>Processing temperature rate</i>	
	°C	°F
ABS	180–240	356–464
Acetal	185–225	365–437
Acrylic	180–250	356–482
Nylon	260–290	500–554
Polycarbonate	280–310	536–590
LDPE	160–240	320–464
HDPE	200–280	392–536
Polypropylene	200–300	392–572
Polystyrene	180–260	356–500
PVC, rigid	160–180	320–365

Figura 2-84: Temperatura de procesamiento del PP [12]

Capítulo 3 : Marco metodológico

3.1 Análisis QFD

El QFD (Quality Function Deployment o Despliegue de la Función de Calidad) es un análisis sistemático de las necesidades del cliente para mejorar la calidad de los productos en diseño. Se originó durante las décadas de 1960 y 1970 en Japón, y se utiliza actualmente para poder encontrar los requerimientos y especificaciones técnicas de un producto a diseñar y ordenarlos según su importancia a tener en cuenta durante el transcurso de diseño en un proyecto.

Dentro de las características que el cliente impone, se pueden obtener características de calidad e importancia para tener en cuenta en el desarrollo del proyecto. En este caso, las necesidades del cliente son las del laboratorio LRSS de la UFMG.

El método se encuentra organizado en 5 partes, siendo las mismas:

1. Escuchar la voz del cliente
2. Desarrollar las especificaciones y objetivos del producto
3. Averiguar cómo las especificaciones miden los deseos de los clientes
4. Determinar que tan bien la competencia completa los objetivos y deseos
5. Desarrollar la importancia numérica de las especificaciones propuestas para trabajar sobre el diseño.

En este caso, no se realizará un estudio de la competencia, debido al carácter académico y de desarrollo personal del proyecto. El diseño de una “casa de calidad” con el método, queda de la siguiente manera:

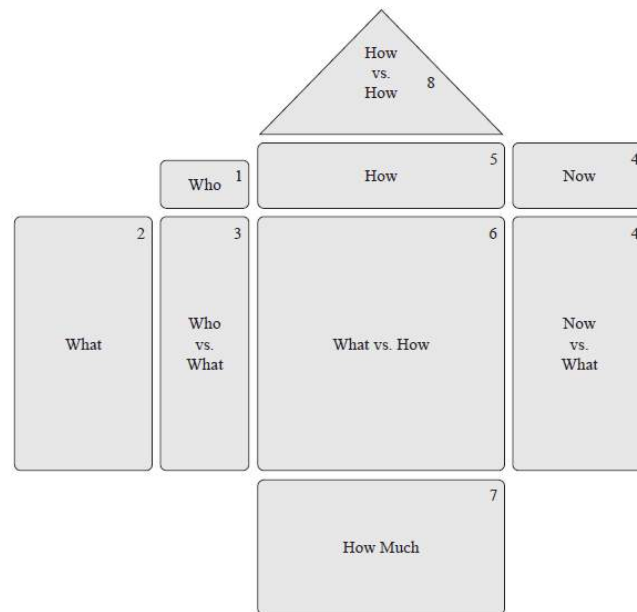


Figura 3-1: Método QFD

El método de QFD es aplicable tanto a sistemas globales como subsistemas que componen al global. En este caso, se realizará un estudio para el sistema global, comprendido por el **cabezal extrusor, el sistema de enfriamiento y el sistema de almacenamiento del electrodo**.

En general, para recopilar las necesidades del cliente se suelen realizar entrevistas y cuestionarios. Para este caso, las necesidades y requerimientos del cliente son las siguientes, utilizando un método de ponderación de importancia de 1 a 5, siendo 5 el criterio más importante y 1 el criterio menos importante:

Tabla 2.1: Requerimientos del usuario.

Tabla 3-1: Requerimientos del usuario.

REQUERIMIENTOS DEL USUARIO		
Nº	REQUERIMIENTO	IMPORTANCIA
1	Calidad dimensional y geométrica del electrodo	5
2	Mantenimiento de los parámetros físicos durante el proceso de extrusión (temperatura, presión, velocidad de corte)	5
3	Uniformidad del revestimiento extruido	5
4	Eficiencia de enfriamiento	5
5	Aseguramiento de las condiciones dimensionales y geométricas en el almacenado	5
6	Facilidad de mantenimiento	4
7	Capacidad de adaptación para variaciones de la reología de la mezcla	3
8	Seguridad	3
9	Facilidad de montaje	3
10	Consumo de energía	2

A partir de estos requerimientos de usuario, es posible definir requerimientos técnicos definidos por los diseñadores, para posteriormente definir una ponderación de importancia para los criterios establecidos. Estos criterios definidos por los diseñadores en su mayoría deben poder ser cuantificables, para poder así obtener variables que sean posibles de medir y modificar en el transcurso del diseño.

A continuación, se muestran las variables técnicas definidas para el sistema global anteriormente mencionado (sistema cabezal de extrusión, sistema de enfriamiento y sistema de almacenado).

Tabla 3-2: Variables técnicas del diseño.

VARIABLES TÉCNICAS DE DISEÑO	
1	Conductividad del cabezal K
2	Temperatura de extrusión [°C]
3	Caída de presión en el cabezal [MPa]
4	Velocidad de ingreso del alma del electrodo [m/s]
5	Caudal de enfriamiento [m³/h]
6	Longitud final del sistema [m]
7	Cantidad de elementos normalizados/comerciales
8	Fuerza de aplicación para el tiro del electrodo en el almacenamiento [N]
9	Esfuerzo de cizalla durante la extrusión [Mpa]
10	Velocidad de extrusión [m/s]

A continuación, se explicarán los requerimientos de usuario para posteriormente, y a partir de los criterios técnicos de los diseñadores, entender las relaciones entre ambas y la ponderación que se utilizará en cada caso.

3.1.1 Requerimientos de usuario

- **Calidad dimensional y geométrica del electrodo:** se encuentra referido a las dimensiones finales obtenidas luego de los procesos intervinientes en estudio (extrusión, enfriamiento y almacenado). El usuario requiere con gran importancia que las dimensiones (cilindricidad, concentricidad) del revestimiento extruido sean las adecuadas una vez finalizados los procesos, además de poseer la ranura que permita el contacto y movimiento constante de la punta de la soldadora a lo largo del electrodo.
- **Mantenimiento de parámetros físicos durante el proceso:** referido al mantenimiento de la temperatura de fusión necesaria a lo largo del cabezal de extrusión, para de esta manera mantener parámetros importantes como viscosidad, densidad de fundido y por consiguiente, fluidez de la mezcla y caudal de extrusión.
- **Uniformidad del revestimiento extruido:** referido a la uniformidad física del mismo, evitando por ejemplo líneas de unión luego del proceso de extrusión, o defectos volumétricos y/o superficiales en el revestimiento que provocan discontinuidades en el revestimiento extruido.

- **Eficiencia de enfriamiento:** se encuentra referido a la potencia y recursos utilizados para poder enfriar el extruido en el menor tiempo posible, utilizando la menor energía posible y en la menor distancia, pero sobre todo asegurando las condiciones de enfriamiento requeridas para obtener un producto listo para su próximo proceso.
- **Aseguramiento de las condiciones dimensionales y geométricas en el almacenado:** hace referencia a que en dicho proceso, no se marque o se deforme el producto con los mecanismos y máquinas intervinientes.
- **Facilidad de mantenimiento:** según requerimientos del usuario, es necesario poder realizar un mantenimiento del sistema de manera sencilla, lo cual requiere diseñar partes del sistema que sean fácilmente desmontables y/o intercambiables en caso que sea necesario.
- **Capacidad de adaptación para variaciones de reología:** debido a que en la realidad, durante el funcionamiento de la máquina extrusora y debido a parámetros externos como la temperatura ambiente, la formulación y calidad del polvo heterogéneo realizado para el ingreso de la extrusora, además de variaciones en el funcionamiento de la máquina, los parámetros como temperatura de extrusión, viscosidad, densidad y por consiguiente, los esfuerzos, presiones y velocidades de corte generadas durante la extrusión por el cabezal, pueden tener una leve variación con respecto a los datos y parámetros utilizados en el diseño de los sistemas. Por esta razón, es necesario diseñar un sistema utilizando un límite superior de parámetros que se encuentren dentro de las variaciones estipuladas, para poder cumplir con los requerimientos reales que tenga el sistema.
- **Seguridad:** referido a colocar las protecciones necesarias para evitar la intervención de extremidades del usuario en las partes que se consideren peligrosas del sistema.
- **Facilidad de montaje del sistema:** este requerimiento se encuentra referido a diseñar un sistema en el cual su montaje dentro del establecimiento sea sencillo, capaz de utilizar piezas o mecanismos que sean comerciales o puedan fabricarse con facilidad y con procedimientos industriales convencionales.

Para que el lector pueda entender las posteriores relaciones entre los *requerimientos del usuario y las especificaciones de ingeniería* utilizadas con mayor facilidad, se procede a explicar brevemente las especificaciones de ingeniería básicas que serán tenidas en cuenta para poder cumplir con los requerimientos del usuario.

3.1.2 Especificaciones técnicas

- **Conductividad del cabezal (K):** este requerimiento de ingeniería surge a partir de la influencia de los parámetros geométricos del cabezal y su desarrollo, el cual influye directamente en el caudal extruido, tal como se puede observar desarrollado en el [Marco Teórico](#). El correcto diseño de los canales internos del cabezal proporcionará un correcto flujo y velocidad del extruido, eliminando zonas de estancamiento y tiempos de residencia que provocan defectos en la extrusión. Este parámetro es adimensional y es utilizado en la ecuación de caudal:

$$Q = K \times \Delta P / \mu \quad (3.1)$$

- **Temperatura de extrusión [°T]:** se encuentra referida a la temperatura de la mezcla durante la extrusión. Para poder mantener la temperatura de la mezcla constante durante el proceso, es muy probable que se deba utilizar algún dispositivo calefactor, y además es necesario poder diseñar un cabezal que permita su adaptación y mantención de la temperatura. Poder mantener esta temperatura permitirá que los parámetros reológicos de la mezcla no varíen, manteniendo constante parámetros como la viscosidad, densidad, y demás factores intervinientes con estos como la fluidez y la velocidad de extrusión.
- **Caída de presión en el cabezal [Mpa]:** en esta variable, se piensa en la caída de presión necesaria para poder obtener una capa definida de revestimiento extruido sobre el alma del electrodo. La caída de presión es inevitable y uno de los parámetros más importantes en el diseño de un cabezal de extrusión. Es necesario que, durante el diseño, se calcule correctamente la caída de presión que se generará en las diferentes zonas del cabezal extrusor. Se recomienda que la caída de presión sea la menor posible para poder mantener un caudal de extrusión constante y uniforme.
- **Velocidad de ingreso del alma del electrodo [m/s]:** esta variable está relacionado con la velocidad a la cual se impulsa el alma del electrodo dentro del cabezal. Esta velocidad debe coincidir con la velocidad lineal de extrusión

calculada para el caudal impuesto de extrusión, ya que de otra manera la capa de extrusión obtenida no será uniforme y correspondiente con los espesores requeridos.

- **Caudal de enfriamiento [m³/h]:** está relacionado con el flujo de fluido de enfriamiento para poder enfriar o retirar calor del revestimiento extruido. El caudal de enfriamiento debe ser tal que permita enfriar el electrodo en el menor tiempo posible y utilizando la menor cantidad de recursos posibles, utilizando un sistema de enfriamiento que posea las dimensiones y requerimientos de energía impuestos. Estos requerimientos se podrán ver en el capítulo correspondiente a los cálculos del sistema de enfriamiento.
- **Longitud final del sistema [m]:** esta variable está relacionado con la longitud que poseerá el sistema una vez diseñados y montados todos los componentes. La longitud final no debe ser excesiva, y por eso es considerada dentro de las variables.
- **Cantidad de elementos normalizados/comerciales:** Poder diseñar el sistema con la mayor cantidad de elementos comerciales o normalizados posibles, facilitará tanto el montaje como el mantenimiento y costos del sistema, además de poder utilizar elementos testeados y fácilmente conseguibles en el mercado.
- **Fuerza de aplicación para el almacenado del electrodo [N]:** esta variable se refiere a la fuerza aplicada por el sistema de tracción del electrodo para poder almacenar el mismo. La misma, no debe ser excesiva para no deformar el revestimiento extruido y conservar las dimensiones y geometría del electrodo.
- **Esfuerzo de cizalla durante la extrusión [Mpa]:** esta variable se refiere al esfuerzo generado entre las paredes del cabezal y el fluido durante la extrusión, en donde no debe superarse un límite (dependiente de la viscosidad y la presión) ya que de otra forma, se producirán defectos superficiales y volumétricos durante la extrusión (defecto de extrusión con escamas)
- **Velocidad de extrusión [m/s]:** la velocidad de extrusión debe coincidir con la velocidad de entrada del alma del electrodo al cabezal. Además, la misma dependerá de factores como la caída de presión y el diseño del cabezal, que evite zonas de estancamiento de la mezcla.

Una vez definidas las variables técnicas (voz del ingeniero) para el sistema a partir de los requerimientos del usuario, se determinan las correlaciones y los pesos de ponderación que se utilizarán en el análisis QFD.

El procedimiento de análisis de QFD se realiza de la siguiente manera:

- 1) Se colocan los requerimientos del usuario con su correspondiente ponderación de importancia en las filas de la “casa de calidad”. Por su parte, se colocan las especificaciones de ingeniería en columnas para así formar espacios entrelazados entre ambas.

Tabla 3-3: Tabla para ponderación de requerimientos.

Factor de incidencia		Importancia	Conductividad del cabezal K	Temperatura de extrusión [°C]	Caída de presión en el cabezal [MPa]	Velocidad de ingreso del alma del electrodo [m/s]	Caudal de enfriamiento [m³/h]	Longitud final del sistema [m]	Cantidad de elementos normalizados / comerciales	Fuerza de aplicación para el almacenado del electrodo [N]	Esfuerzo de cizalla durante la extrusión [MPa]	Velocidad de extrusión [m/s]	Voz del ingeniero
	9 (fuerte)												
	3 (media)												
	1 (baja)												
Voz del usuario	Calidad dimensional y geométrica del electrodo	5											
	Mantenimiento de parámetros físicos durante el proceso	5											
	Uniformidad de revestimiento extruido	5											
	Eficiencia de enfriamiento	5											
	Aseguramiento de las condiciones geométricas en el almacenado	5											
	Facilidad de mantenimiento	4											
	Capacidad de adaptación para variaciones de reología	3											
	Seguridad	3											
	Facilidad de montaje del sistema	3											
	Consumo de energía	2											

En los espacios blancos, se analizará la relación existente entre los requerimientos y las especificaciones.

Las correlaciones y los pesos de ponderación que se utilizan en el análisis QFD son:

Factor de incidencia	
	9 (fuerte)
	3 (media)
	1 (baja)

Figura 3-2: Referencias del factor de incidencia.

En caso de que no exista ningún tipo de relación entre las variables, se deja el cuadro en blanco.

- 2) Una vez completadas las relaciones según su factor de incidencia, se procede a calcular el peso (importancia) de cada especificación de ingeniería en el sistema a diseñar.

Para el cálculo, se realiza la sumatoria de los productos entre el valor del factor de incidencia (9, 3, 1) y la importancia de los requerimientos del usuario (1 a 5) para cada columna (especificación). Expresado en términos matemáticos:

$$Incidencia = \sum Imp \text{ Requerimiento } \times \text{Factor incidencia} \quad (3.1)$$

Los valores se expresan debajo de la matriz de correlaciones realizada.

Tabla 3-4: Ponderación de los requerimientos.

Factor de incidencia		Importancia	Conductividad del cabezal K	Temperatura de extrusión [°C]	Caída de presión en el cabezal [MPa]	Velocidad de ingreso del alma del electrodo [m/s]	Caudal de enfriamiento [m³/h]	Longitud final del sistema [m]	Cantidad de elementos normalizados / comerciales	Fuerza de aplicación para el almacenado del electrodo [N]	Esfuerzo de cizalla durante la extrusión [MPa]	Velocidad de extrusión [m/s]	Voz del ingeniero
	9 (fuerte)												
	3 (media)												
	1 (baja)												
Voz del usuario	Calidad dimensional y geométrica del electrodo	5											
	Mantenimiento de parámetros físicos durante el proceso	5											
	Uniformidad de revestimiento extruido	5											
	Eficiencia de enfriamiento	5											
	Aseguramiento de las condiciones geométricas en el almacenado	5											
	Facilidad de mantenimiento	4											
	Capacidad de adaptación para variaciones de reología	3											
	Seguridad	3											
	Facilidad de montaje del sistema	3											
	Consumo de energía	2											
	Incidencia		147	189	162	75	65	84	72	135	72	45	
	Incidencia Relativa (%)		14 %	18 %	15,5 %	7 %	6 %	8 %	7 %	13 %	7 %	4,5 %	

Como ejemplo, para calcular la incidencia de la especificación Temperatura de extrusión [°C], se realiza:

$$Incidencia = (9 \times 5) + (9 \times 5) + (9 \times 5) + (3 \times 4) = 147 \quad (3.2)$$

Como se puede observar, las especificaciones más importantes a tener en cuenta en el diseño del sistema son la temperatura de extrusión, la caída de presión en el cabezal y la conductividad del cabezal (factor según forma geométrica del cabezal) respectivamente. Se destaca también la velocidad de extrusión, el caudal de

enfriamiento y la fuerza de aplicación sobre el electrodo para el almacenamiento, los cuales tendrán efectos importantes en las dimensiones físicas del sistema.

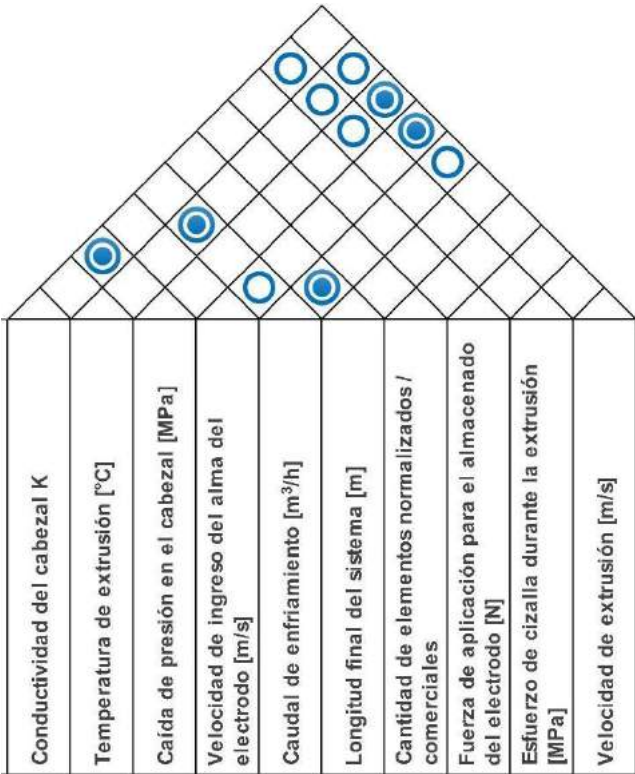
- 3) Posteriormente se procede a completar el resto de la casa de calidad, añadiendo el “techo” de la casa, el cual indica las relaciones entre las especificaciones de ingeniería entre sí. Las correlaciones se indican según la siguiente tabla de importancia:

Relación entre especificaciones	
	Fuerte
	Media
	Baja

Figura 3-3: Referencias del factor de incidencia.

Las relaciones quedan de la siguiente manera:

Tabla 3-5: Ponderación entre las especificaciones de ingeniería.



Como se observa, existe una relación fuerte entre la conductividad del cabezal y la caída de presión, las 2 especificaciones más importantes. La caída de presión también tendrá una relación importante con el caudal de extrusión, debido a que su valor

determinará el caudal de extrusión por el cabezal, ocasionando mayor o menor cantidad de flujo de retroceso. Un factor que también estará implicado en la calidad de extrusión será el esfuerzo de cizalla durante la extrusión, el cual dependerá, además de los parámetros reológicos del material a extruir, de la forma geométrica que presente el cabezal, y, por lo tanto, también con la caída de presión. Se puede observar que varias especificaciones se encuentran relacionadas, ocasionando así correlaciones entre la geometría del cabezal, la caída de presión, el esfuerzo de cizalla y el caudal extruido.

También, la temperatura de extrusión tendrá una relación fuerte con el caudal de enfriamiento, debido a que, a mayor temperatura de extrusión, mayor deberá ser el caudal para enfriar una unidad de volumen del electrodo.

Por su parte, las velocidades de entrada del alma del electrodo y de extrusión tendrán una fuerte relación debido a que deben estar coordinadas para que la extrusión sea uniforme y con la calidad geométrica y dimensional requerida.

En general, los análisis de QFD se realizan con evaluaciones de sistemas y productos de la competencia, para poder determinar contra qué tipo de diseños se estará desarrollando el proyecto, y evaluar puntos fuertes y características. Para este caso, no se utilizará el análisis de competencia debido al carácter académico del proyecto.

El QFD final queda de la siguiente manera:

Tabla 3-6: QFD final

Relación entre especificaciones	
	Fuerte
	Media
	Baja

Factor de incidencia	
	9 (fuerte)
	3 (media)
	1 (baja)

Voz del usuario	Calidad dimensional y geométrica del electrodo	5											
	Mantenimiento de parámetros físicos durante el proceso	5											
	Uniformidad de revestimiento extruido	5											
	Eficiencia de enfriamiento	5											
	Aseguramiento de las condiciones geométricas en el almacenado	5											
	Facilidad de mantenimiento	4											
	Capacidad de adaptación para variaciones de reología	3											
	Seguridad	3											
	Facilidad de montaje del sistema	3											
	Consumo de energía	2											
	Incidencia		147	189	162	75	65	84	72	135	72	45	
	Incidencia Relativa (%)		14 %	18 %	15,5 %	7 %	6 %	8 %	7 %	13 %	7 %	4,5 %	

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

A partir de esta herramienta se puede determinar en qué características se debe tener mayor importancia en el diseño, para así satisfacer las necesidades del usuario.

Se deberá realizar un correcto dimensionamiento del cabezal para lograr un coeficiente de conductividad K adecuado para el flujo volumétrico deseado, y esto estará reflejado en la caída de presión existente y con ello, parámetros como el esfuerzo de cizalla, el caudal y velocidad de extrusión.

3.2 Método de diseño: análisis morfológico

A partir de la estructura de diseño de un producto presentada en el libro “The mechanical design process - David G. Ullman” [2], tomado como estructura para el desarrollo del proyecto y sus etapas, se continúa el marco metodológico a partir de la definición de un tipo de procedimiento para el diseño del sistema estudiado.

Como expresa Ullman en el capítulo 7 titulado “Concept Generation”, existen diferentes maneras y herramientas para generar ideas y conceptos para un diseño en estudio. Entre las más destacadas, se pueden encontrar el **brainstorming**, muy utilizado en grupos de trabajo de diseño, **analogías de diseño**, en donde se propone encontrar conceptos o ideas que generen una función similar a la deseada, **búsqueda de diseños similares en bibliografías**, también combinada con la utilización de **patentes de invención de productos** o funciones similares, la utilización de **ideas contradictorias al funcionamiento del sistema**, en donde se plantean posibles problemas para poder pensar en soluciones de diseño, **la teoría inventiva de Triz**, y también la utilización de la construcción de una **matriz morfológica**.

Para el desarrollo del actual proyecto, se utilizará el método de generación de una matriz morfológica para obtener, luego del proceso correspondiente, un modelo representativo (sistema de componentes) que cumpla con los requerimientos planteados.

El proceso de generación de una matriz morfológica implica una serie de pasos, que pueden detallarse como sigue:

1. Descomposición funcional del sistema en diseño
2. Generación de ideas y conceptos a partir de la matriz morfológica
3. Selección de las ideas a partir del método ponderativo de soluciones

Aplicando esta metodología, se obtendrá, una vez finalizado del proceso, un diseño que se adapte a las necesidades del cliente, adquiriendo también las especificaciones de ingeniería planteadas por los ingenieros. Una de las ventajas del método y motivo

de selección del mismo nace en la posibilidad de obtener, luego de un refinamiento funcional del sistema global en estudio, diferentes ideas y conceptos para cada componente del mismo, pudiendo obtener ideas para generar subsistemas basados en conceptos funcionales globales. De esta forma, es posible seleccionar, al final del método, los componentes y elementos que mejor cumplan con las necesidades.

3.2.1 Análisis funcional

Primeramente, previo a cualquier idea conceptual para el sistema en diseño, el método de análisis morfológico plantea realizar un **Análisis funcional** del sistema en estudio, para una comprensión de la función del sistema global y sus componentes. Poseer un análisis funcional, el cual comenzará por un nivel básico de comprensión y posteriormente, luego de iteraciones y refinamientos, contará con un nivel de detalle mucho más real del problema y otorgará una visión clave para reconocer cuáles son los sistemas implicados en el proceso de diseño y cómo interactúan entre ellos.

Para realizar un análisis funcional es necesario primero entender el concepto de función de un sistema o producto. La función se define como el *“flujo lógico de energía (incluyendo fuerzas estáticas), material o información entre objetos o el cambio de estado de un objeto causado por uno o más de los flujos”* [2]

Por lo tanto, se comprende que en un análisis funcional existirán flujos de energía, material e información, los cuales actuarán entre sí para determinar el comportamiento del sistema.

Los flujos relacionados con la energía se pueden clasificar por el tipo de energía y su acción en el sistema. Como ejemplo, pueden existir flujos de energía mecánicos, eléctricos, de fluidos, térmicos, entre otros. Estas energías pueden ser transformadas, almacenadas, transferidas, disipadas. Estas son las acciones que realizan los componentes o ensamblajes en el sistema. Por lo tanto, todos los términos utilizados para describir a un flujo de energía son “acciones”. Parte del flujo de energía también son las fuerzas actuantes, aunque no resulten en movimiento.

Los flujos relacionados con materiales se pueden dividir en tres tipos. Proceso de conservación del material, donde el material es manipulado para cambiar su posición o forma. Algunos términos relacionados con este flujo son posición, levantar, mantener, soportar, mover, trasladar o rotar. El segundo tipo es denominado flujo de divergencia, el cual representa una división del material en uno o más cuerpos. Para

este flujo, los términos más utilizados son desarmar y separar. Por último, el flujo de convergencia, representa acciones para mezclar, unir o situar relativo a algo.

Las funciones relacionadas con el flujo de información pueden ser señales mecánicas, eléctricas o de software. Generalmente, la información es utilizada como parte de controles automáticos del sistema.

A continuación, se presenta un análisis funcional, realizado con un método progresivo de niveles, hasta poder llegar a un diagrama que represente el caso en estudio con un nivel de subsistemas y componentes que permita el comienzo de la etapa de generación de conceptos.

3.2.1.1 Análisis funcional: Nivel 0

En el primer nivel funcional se presenta un único bloque, el cual representa el sistema completo en estudio, y por donde ingresan flujos de energía, material e información para obtener un producto u objetivo.

Los flujos son distinguidos mediante los siguientes colores:

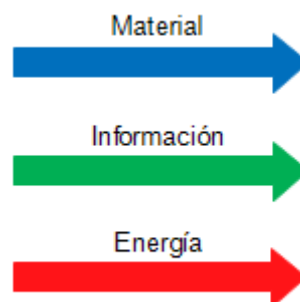


Figura 3-4: Flujos de energía

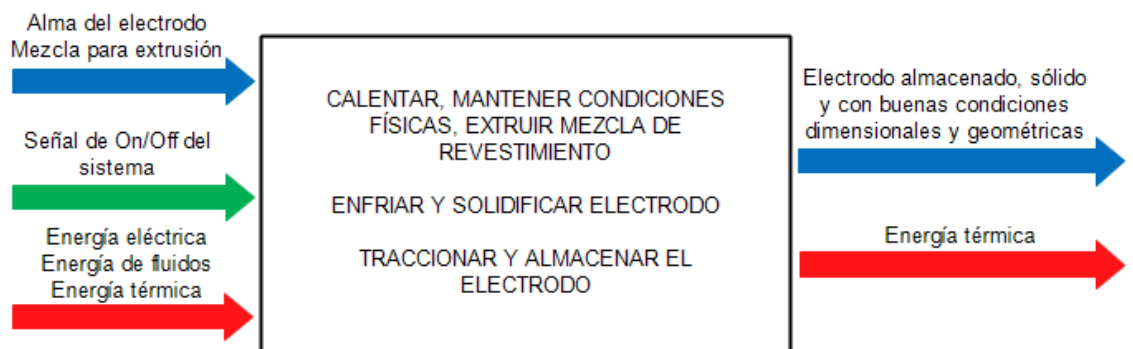


Figura 3-5: Flujo de energía para el caso en estudio.

Como se puede observar, el sistema completo está comprendido por todos los componentes: máquina extrusora, cabezal de extrusión, sistema enfriador, sistema de tracción y almacenamiento.

Los únicos elementos materiales que ingresan al sistema son el alma del electrodo (ya conformada) y la mezcla de extrusión en estado homogéneo con las características físicas correspondientes.

3.2.1.2 Análisis funcional: Nivel 1

En el nivel 1 se realiza un refinamiento al sistema global, realizando una división en los sistemas que componen al mismo.

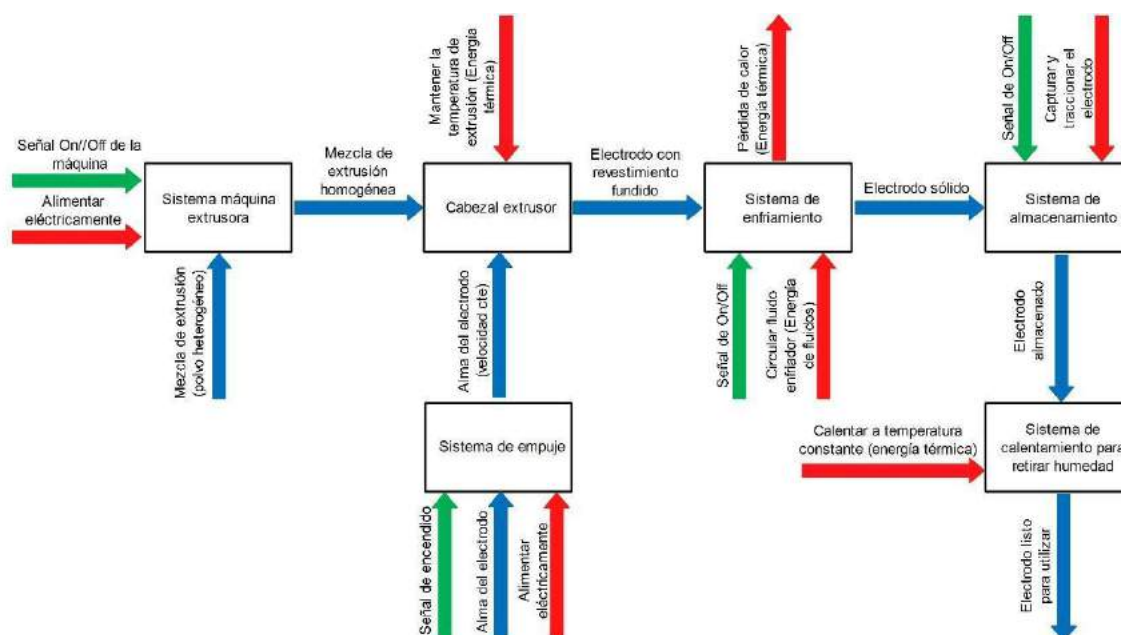


Figura 3-6: Análisis funcional nivel 1.

En este nivel, se pueden observar 6 subsistemas dentro del sistema global de producción del electrodo:

- **Sistema de máquina extrusora:** compuesto por los elementos necesarios para la extrusión (tornillo, sistema de potencia, estructura, sistema de calentamiento, entre otros). Al mismo le llega un flujo de energía para energizar eléctricamente la máquina, un flujo de información el cual representa la señal del usuario para encender el sistema y un flujo material que representa el ingreso de la mezcla heterogénea entre polvo rutilico, polipropileno y solvente, previamente realizada.

- **Sistema cabezal extrusor:** en el cabezal extrusor se encuentran los elementos que realizan la conducción de la mezcla y extrusión de la misma con forma anular alrededor del alma del electrodo (mandril central, canales de extrusión, zona de ingreso del electrodo, boquilla de extrusión). Al mismo le llega en forma de flujo de material el alma del electrodo a una velocidad constante, y la mezcla de extrusión homogénea con las condiciones necesarias para la extrusión (temperatura, fusión, presión). En forma de energía, se representa la energía térmica necesaria para mantener la temperatura de la mezcla constante durante la extrusión (a través de algún dispositivo calefactor colocado en la estructura de cabezal)
- **Sistema de enfriamiento:** una vez que se extruye el revestimiento sobre el alma del electrodo, el mismo ingresa (flujo material) al sistema de enfriamiento con el objetivo de enfriar el mismo para solidificar el revestimiento y poder así manipularlo. Al sistema de enfriamiento ingresan el flujo de información (señal de accionamiento), un flujo de energía que representa el movimiento de fluido refrigerante para enfriar el electrodo y un flujo de energía que representa la energía térmica de pérdida de calor del electrodo durante el enfriamiento.
- **Sistema de almacenamiento:** al mismo ingresa el electrodo en estado sólido, además del flujo de información (señal de accionamiento) y de energía (accionamiento para traccionar y almacenar el electrodo).
- **Sistema de calentamiento para retirar humedad:** una vez que el electrodo se ha almacenado, el mismo ingresa a un horno a temperatura constante para retirar la humedad y poder utilizarse en buenas condiciones.

Dentro de este sistema global, en el alcance de este proyecto se establece que los contenidos a estudiar son: sistema de cabezal de extrusión, sistema de enfriamiento y sistema de almacenamiento del electrodo. Por lo tanto, se puede recortar el sistema global para sólo estudiar los subsistemas en cuestión, tomando como parámetros de entrada las salidas de los subsistemas que no se encuentran envueltos en el alcance.

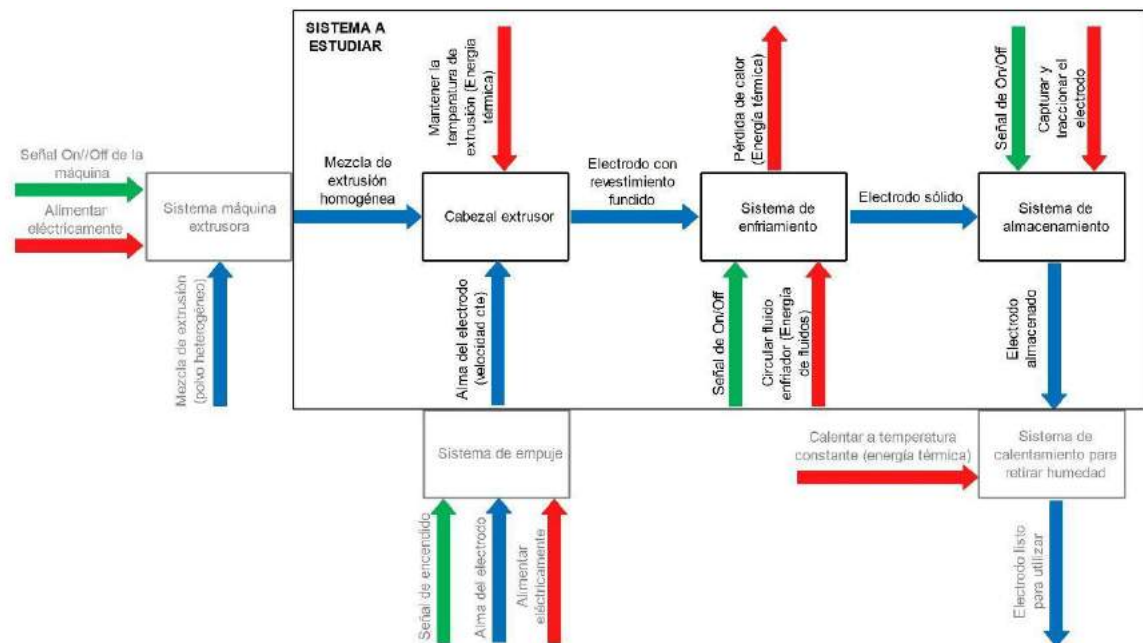


Figura 3-7: Análisis funcional nivel 1.

3.2.1.3 Análisis funcional: Nivel 2

A partir de la anterior segmentación del sistema a estudiar, se puede dividir el mismo en diferentes subsistemas para analizar cada uno de forma individual, y posteriormente realizar el análisis morfológico de cada uno.

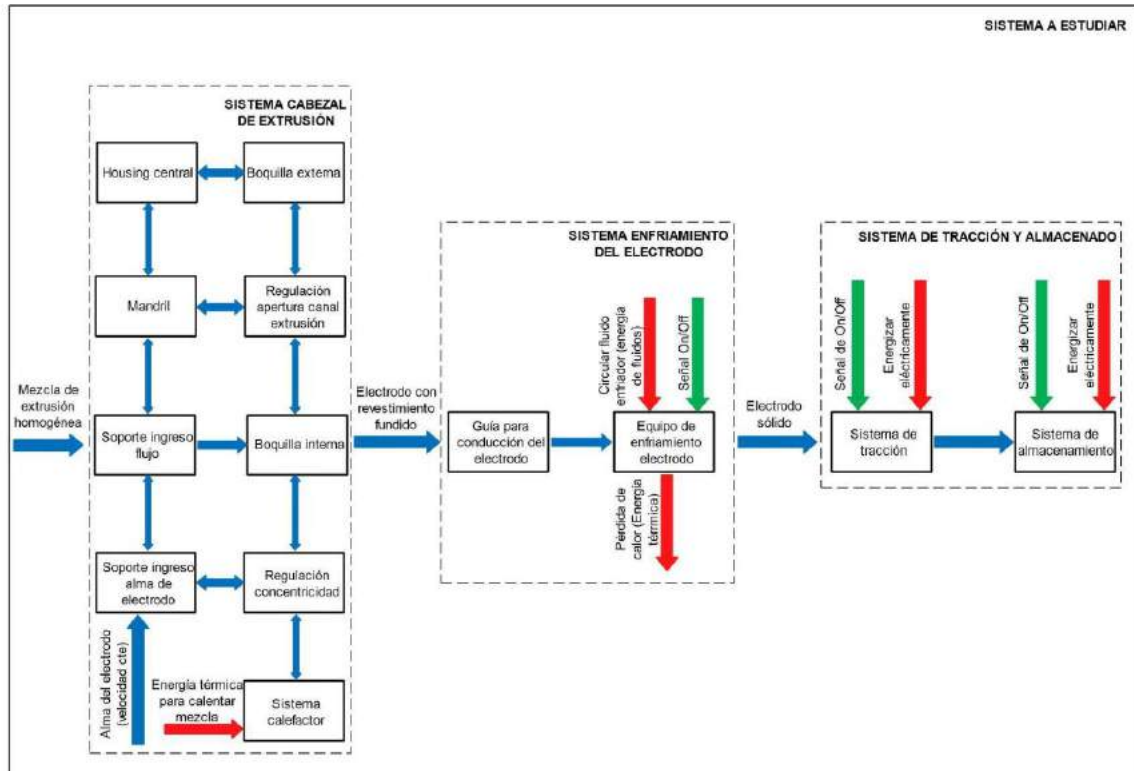


Figura 3-8: Análisis funcional nivel 2.

Como se observa en la anterior imagen, el sistema en estudio en el actual proyecto se divide en:

- **Sistema cabezal de extrusión:** el mismo se encuentra compuesto por los diferentes dispositivos, piezas y elementos que conforman al cabezal de extrusión. A este sistema, ingresa una mezcla de extrusión homogénea proveniente del cilindro y tornillo de la máquina extrusora. A partir de la información y análisis proporcionada en el capítulo 2 (insertar hipervínculo hacia el subtítulo correspondiente del capítulo 2) se obtuvo, a partir de criterio de los diseñadores, las partes fundamentales que, a partir de su unión, formarán en conjunto el sistema de cabezal de extrusión.

Previamente a definir las mismas, es necesario definir que en nuestro sistema, la disposición de cabezal para conformar la dirección de extrusión, se realiza perpendicularmente al ingreso del flujo proveniente del tornillo de la extrusora (dirección de ingreso de flujo a 90° con respecto de la dirección de extrusión). Esto se toma a partir de un criterio de los diseñadores, luego de la investigación y análisis correspondiente en donde se puede observar que la mayoría de los cabezales de extrusión para recubrimiento de cables, alambres y objetos cilíndricos, son realizados de esta manera. Además, se menciona que los sistemas externos al cabezal, como el

sistema de tiro del alma del electrodo, no son tenidos en cuenta en el diseño del mismo.

Una vez mencionados los anteriores ítems, se destacan las partes constituyentes del sistema cabezal de extrusión:

- **Soporte ingreso flujo:** este componente funciona como un conector entre las partes de salida de la máquina extrusora (brida del cilindro) y el cabezal extrusor. El mismo contiene el plato rompedor y los posteriores conductos que llevan al flujo hacia el interior del cabezal.
- **Mandril:** tal como se explica en el capítulo 2 del proyecto referido a los cabezales de extrusión, el mandril es la parte central de la parte interna del cabezal de extrusión, y posee la forma geométrica para poder derivar al flujo proveniente del soporte ingreso flujo hacia los canales anulares que guiarán al flujo hacia la boquilla de salida para su posterior extrusión.
- **Soporte ingreso alma del electrodo:** este componente permite el ingreso centrado del alma del electrodo hacia el interior del cabezal, en la misma dirección que la mezcla de extrusión.
- **Boquilla interna:** luego del mandril, se encuentra unido al mismo un componente sobre el cual fluirá la mezcla de extrusión hasta su correspondiente salida. La boquilla interna debe poseer un orificio interno por donde pasará el alma del electrodo y además, poseer las dimensiones geométricas para permitir la correcta unión entre la mezcla de extrusión y el alma.
- **Boquilla externa:** la boquilla externa se encuentra rodeando la boquilla interna y es la que forma, junto con esta última, el canal anular por donde fluirá la mezcla hasta su extrusión fuera del cabezal.
- **Regulación apertura canal de extrusión:** para poder tener una regulación “fina” de la apertura del canal de extrusión debido a por ejemplo, cambios leves en la reología de la mezcla, temperatura, presión, caudal y también caída de presión, entre las principales variables intervinientes.
- **Regulación concentricidad:** debido a que la extrusión se da por el principio de encuentro entre la mezcla homogénea y el alma del electrodo, la cual se desplaza con movimiento constante sobre el interior de los movimientos del

cabezal, es necesario poder ajustar la posición de los canales anulares por donde circula el flujo con respecto al alma del electrodo, para poder obtener un producto extruido con la concentricidad y uniformidad de revestimiento deseada.

- **Housing central:** este componente es sobre el cual irán montados y fijados los demás elementos del sistema, como los soportes de ingreso, fijaciones y boquillas.
- **Sistema calefactor:** El sistema calefactor se coloca en el cabezal para poder calentar y mantener la temperatura y, por lo tanto, las condiciones físicas de la mezcla durante la extrusión. A este sistema, se le ingresa un flujo de energía térmica para transmitir la misma al sistema del cabezal de extrusión.
- **Sistema de enfriamiento del electrodo:** una vez que el electrodo sale del sistema cabezal de extrusión, el mismo debe ser enfriado para poder manipular el mismo en el sistema de almacenamiento. El electrodo que sale del cabezal de extrusión posee el revestimiento extruido a una temperatura mayor a 200°C, por lo que debe enfriarse por debajo del punto de fusión del polímero para posteriormente poder manipularlo y almacenarlo.
- **Sistema de tracción y almacenado:** Este se encuentra compuesto por un sistema de tracción del electrodo, al cual le ingresa un flujo de energía e información para su energización y funcionamiento. Este dispositivo se encarga de mantener traccionado el electrodo que sale desde la extrusora hacia la tina de enfriamiento para mantener los parámetros de velocidad y extrusión constantes. Posteriormente, el sistema de almacenamiento recibe el electrodo, ya con su revestimiento en estado sólido, y procede a almacenarlo para el siguiente proceso de secado del mismo.

3.2.2 Matriz morfológica y generación de conceptos

Continuando con el análisis para el diseño del sistema en estudio, una vez ya obtenida la descomposición funcional de los sistemas y su estructura, se procede a la generación de ideas de diseño.

Previo a realizar un diseño conceptual, se comienza realizando la matriz morfológica. La misma, se encuentra dividida entre los 3 subsistemas existentes en el sistema global, cada uno subdividido en componentes que fueron reconocidos como

“generales” en sistemas similares reales, basados en la investigación del marco teórico de este proyecto.

A partir de esto, se obtiene una matriz en donde se expresa cada subsistema con los componentes que lo definen, y diferentes alternativas para la generación de las posibles soluciones:

MATRIZ MORFOLÓGICA					
	COMPONENTE	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	ALTERNATIVA 4
SISTEMA CABEZAL DE EXTRUSIÓN	HOUSING	CUERPO CON UNIONES MEDIANTE BULONES	CUERPO CON UNIONES MEDIANTE ROSCA		
	MANDRIL	SUJETADO AL HOUSING - ALIMENTADO LATERALMENTE	CON PATAS DE ARAÑA	CON CILINDRO PERFORADO	CON ESPIRALES
	SOPORTE INGRESO FLUIDO	UNIDO MEDIANTE BULONES	UNIDO MEDIANTE ROSCA		
	SOPORTE INGRESO ALMA DEL ELECTRODO	UNA UNIDAD DE SOPORTE SUJETADO AL MANDRIL	MÁS DE UNA UNIDAD DE SOPORTE SUJETADAS AL MANDRIL	FLUIDO CALIENTE A PRESIÓN	SISTEMA DE AIRE A PRESIÓN
	BOQUILLA EXTERNA	SUJETADA AL HOUSING MEDIANTE BULONES			
	DADO DE EXTRUSIÓN	ROSCADO A LA BOQUILLA EXTERNA			
	BOQUILLA INTERNA	ROSCADA AL MANDRIL	SUJETADA MEDIANTE SISTEMA DE REGULACIÓN		
	REGULACIÓN APERTURA CANAL DE EXTRUSIÓN	BOQUILLAS INTERCAMBIABLES	VÁLVULA ANULAR (ACTIVACIÓN POR DESPLAZAMIENTO LATERAL)	DISCO ANULAR PIVOTADO	
	REGULACIÓN CONCENTRICIDAD	CON TORNILLO QUE AJUSTE LA BOQUILLA EXTERNA			
	SISTEMA CALEFACTOR	RESISTENCIAS ELÉCTRICAS	FLUIDO CALENTADOR		
SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DEL ELECTRODO	GUÍA PARA CONDUCCIÓN DEL ELECTRODO	RODILLO CON RADIO	CILINDRO DE APOYO		
	EQUIPO DE ENFRIAMIENTO	ANULAR CON AIRE	TINA DE ENFRIAMIENTO DE AGUA	LLUVIA DE AGUA	AIRE- y AGUA
SISTEMA DE TRACCIÓN Y ALMACENADO	SISTEMA DE TRACCIÓN	RUEDAS ENFRENTADAS	CINTAS TRANSPORTADORAS ENFRENTADAS REGULABLES	RUEDAS ENFRENTADAS CON RADIOS	
	SISTEMA DE ALMACENADO	ENRIOLLADO	ZIG - ZAG		

Figura 3-9: Matriz morfológica

Las diferentes alternativas colocadas para cada componente referenciado a cada subsistema son producto de la investigación y referencias correspondientes, que pueden observarse en el capítulo referente al marco teórico.

Una vez generada la matriz morfológica, se procede a desarrollar diferentes conceptos de solución globales a partir de la unión de diferentes componentes, obteniendo así una diversidad de alternativas de solución con diferentes propuestas.

Esto permite encontrar, entre todas las variables, alternativas de solución que no se encuentren “centradas” sólo en un tipo de solución, si no que se obtienen mezclas de alternativas que posteriormente servirán para la ponderación de la “mejor solución”, la cual será la que mayormente se adapte a los criterios de evaluación.

Las alternativas de solución propuestas son las siguientes:

MATRIZ MORFOLOGICA						
	COMPONENTE	SOLUCIÓN 1	SOLUCIÓN 2	SOLUCIÓN 3	SOLUCIÓN 4	SOLUCIÓN 5
SISTEMA CABEZAL DE EXTRUSIÓN	HOUSING	CUERPO CON UNIONES MEDIANTE ROSCA	CUERPO CON UNIONES MEDIANTE ROSCA	CUERPO CON UNIONES MEDIANTE ROSCA	CUERPO CON UNIONES MEDIANTE ROSCA	CUERPO CON UNIONES MEDIANTE ROSCA
	MANDRIL	CON ESPIRALES	SUJETADO AL HOUSING - ALIMENTADO LATERALMENTE	SUJETADO AL HOUSING - ALIMENTADO LATERALMENTE	SUJETADO AL HOUSING - ALIMENTADO LATERALMENTE	SUJETADO AL HOUSING - ALIMENTADO LATERALMENTE
	SOPORTE INGRESO FLUJO	UNIDO MEDIANTE ROSCA	UNIDO MEDIANTE ROSCA	UNIDO MEDIANTE ROSCA	UNIDO MEDIANTE ROSCA	UNIDO MEDIANTE ROSCA
	SOPORTE INGRESO ALMA DEL ELECTRODO	FLUIDO CALIENTE A PRESIÓN	SISTEMA DE AIRE A PRESIÓN	SISTEMA DE AIRE A PRESIÓN	MAS DE UNA UNIDAD DE SOPORTE SUJETADAS AL MANDRIL	UNIDO A SISTEMA REGULADOR DE APERTURA DE CANAL DE EXTRUSIÓN
	BOQUILLA EXTERNA	SUJETADA AL HOUSING MEDIANTE BULONES	SUJETADA AL HOUSING MEDIANTE BULONES	SUJETADA AL HOUSING MEDIANTE BULONES	SUJETADA AL HOUSING MEDIANTE BULONES	SUJETADA AL HOUSING MEDIANTE BULONES
	DADO DE EXTRUSIÓN	ROSCADO A LA BOQUILLA EXTERNA	ROSCADO A LA BOQUILLA EXTERNA	ROSCADO A LA BOQUILLA EXTERNA	ROSCADO A LA BOQUILLA EXTERNA	ROSCADO A LA BOQUILLA EXTERNA
	BOQUILLA INTERNA	EN EL MANDRIL	ROSCADA AL MANDRIL	SUJETADA CON DISPOSITIVO REGULADOR	ROSCADA AL MANDRIL	SUJETADA CON DISPOSITIVO REGULADOR
	REGULACIÓN APERTURA CANAL DE EXTRUSIÓN	DISCO ANULAR PIVOTADO	BOQUILLAS INTERCAMBIABLES	VÁLVULA ANULAR (DESPLAZAMIENTO LATERAL ACTIVACIÓN POR PALANCA)	BOQUILLAS INTERCAMBIABLES	VÁLVULA ANULAR (DESPLAZAMIENTO LATERAL ACTIVACIÓN MEDIANTE ROSCA)
	REGULACIÓN CONCENTRICIDAD	CON TORNILLOS QUE AJUSTEN LA BOQUILLA EXTERNA	CON TORNILLOS QUE AJUSTEN LA BOQUILLA EXTERNA	CON TORNILLOS QUE AJUSTEN LA BOQUILLA EXTERNA	CON TORNILLOS QUE AJUSTEN LA BOQUILLA EXTERNA	CON TORNILLOS QUE AJUSTEN LA BOQUILLA EXTERNA
	SISTEMA CALEFACTOR	FLUIDO CALENTADOR	RESISTENCIAS ELÉCTRICAS	RESISTENCIAS ELÉCTRICAS	RESISTENCIAS ELÉCTRICAS	RESISTENCIAS ELÉCTRICAS
SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DEL ELECTRODO	GUÍA PARA CONDUCCIÓN DEL ELECTRODO	RODILLO CON RADIO	RODILLO CON RADIO	RODILLO CON RADIO	RODILLO CON RADIO	RODILLO CON RADIO
	EQUIPO DE ENFRIAMIENTO	TINA DE AGUA	ANULAR CON AIRE	ANULAR CON AIRE	LLUVIA DE AIRE + AGUA	TINA DE AGUA
SISTEMA DE TRACCIÓN Y ALMACENADO	SISTEMA DE TRACCIÓN	RUEDAS ENFRENTADAS CON RADIOS	CINTAS TRANSPORTADORAS ENFRENTADAS REGULABLES	CINTAS TRANSPORTADORAS ENFRENTADAS REGULABLES	CINTAS TRANSPORTADORAS ENFRENTADAS REGULABLES	CINTAS TRANSPORTADORAS ENFRENTADAS REGULABLES + SISTEMA CENTRADOR CON RUEDAS ACANALADAS
	SISTEMA DE ALMACENADO	ENROLLADO	ENROLLADO	ENROLLADO	ENROLLADO	ENROLLADO

Figura 3-10: Posibles soluciones.

Estas 5 opciones de solución, como anteriormente se mencionó, surgen a partir de la unión de las alternativas basadas en los criterios de los diseñadores.

Como continuación del método, se presentan croquis de las soluciones para tener un conocimiento real de las opciones.

3.2.2.1 Solución 1

- Sistema cabezal de extrusión:

En la siguiente imagen se muestra la propuesta de solución para el cabezal. Se observa el mandril con espirales, el disco anular pivotado (que permite la regulación de la apertura del canal de extrusión) que se mueve mediante una transmisión de movimiento con un sistema que se encuentra fuera del housing y el ingreso del fluido para el centrado del alambre. Además, se observa el ingreso del fluido calentador para calefacción del housing. El electrodo sale del cabezal con la forma final de extrusión debido a que el dado de extrusión posee una pieza regulable que permite que solo se coloque recubrimiento en las partes deseadas.

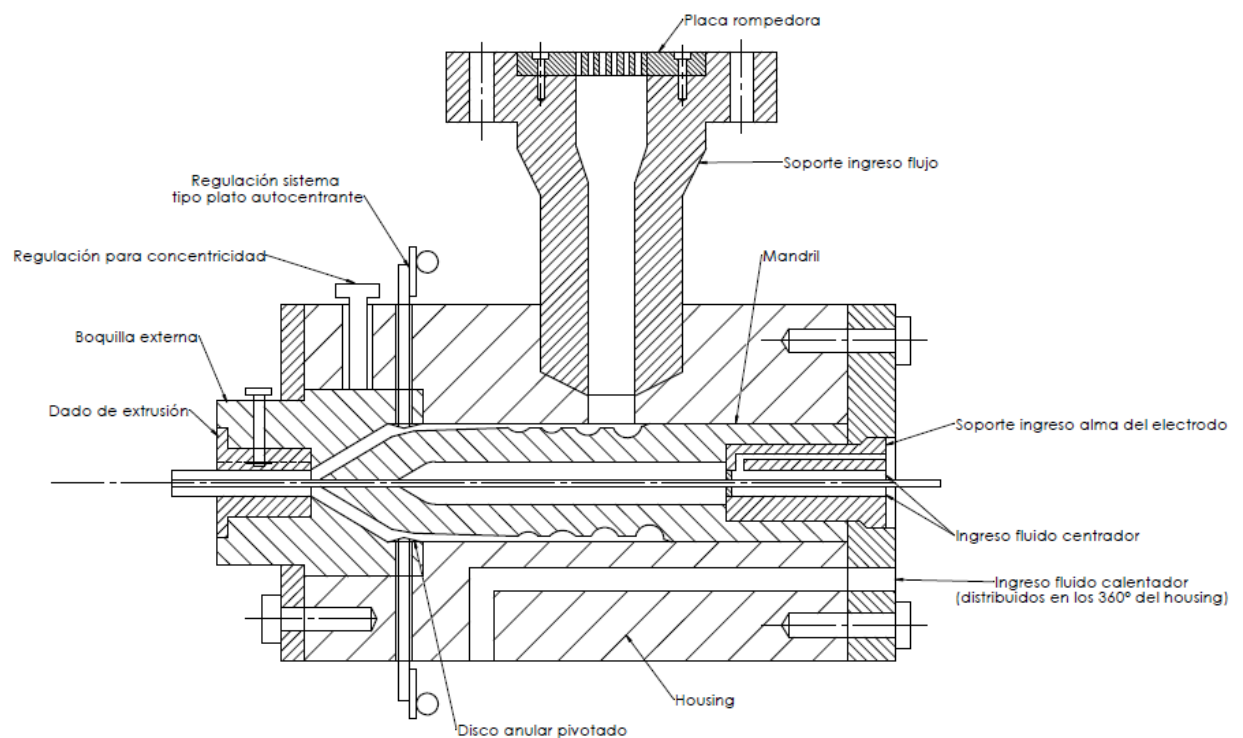


Figura 3-11: Propuesta de solución 1.



Figura 3-12: Detalle del dado de extrusión.

- Sistema de enfriamiento:

El enfriamiento se propone a partir del paso del electrodo por una tina de agua.

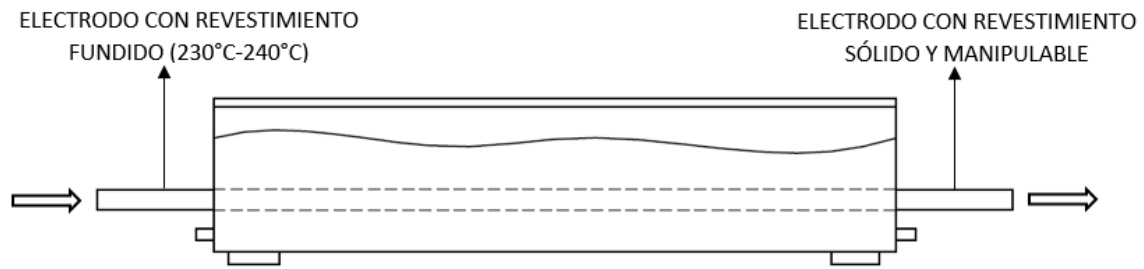


Figura 3-13: Tina de agua.

- **Sistema de tracción y almacenado:**

Ruedas enfrentadas con radio: poseen el mismo radio del electrodo para no dañar su condición geométrica y aumentar el área de contacto.

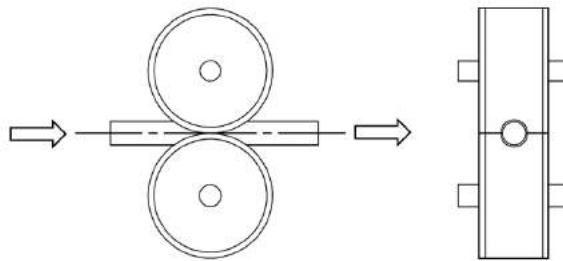


Figura 3-14: Sistema de conducción.

3.2.2.2 Solución 2

- **Sistema cabezal de extrusión:**

Se puede apreciar el sistema de aire para el centrado del alambre, la boquilla interna intercambiable para la regulación del canal de extrusión y las resistencias eléctricas para mantener la temperatura del housing.

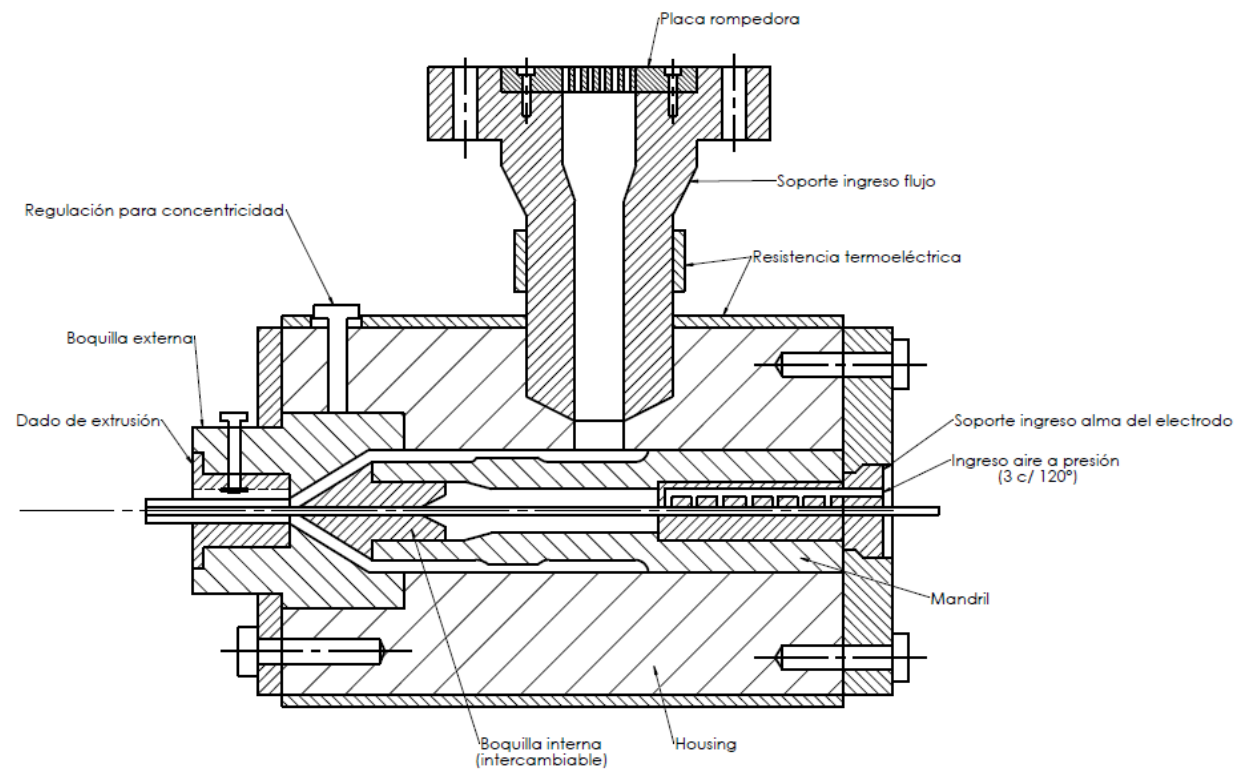


Figura 3-15: Solución 2, cabezal de extrusión

- **Sistema de enfriamiento**

Sistema anular con aire: el electrodo ingresa a un espacio cilíndrico donde se inyecta aire a presión radialmente a partir de unas boquillas.

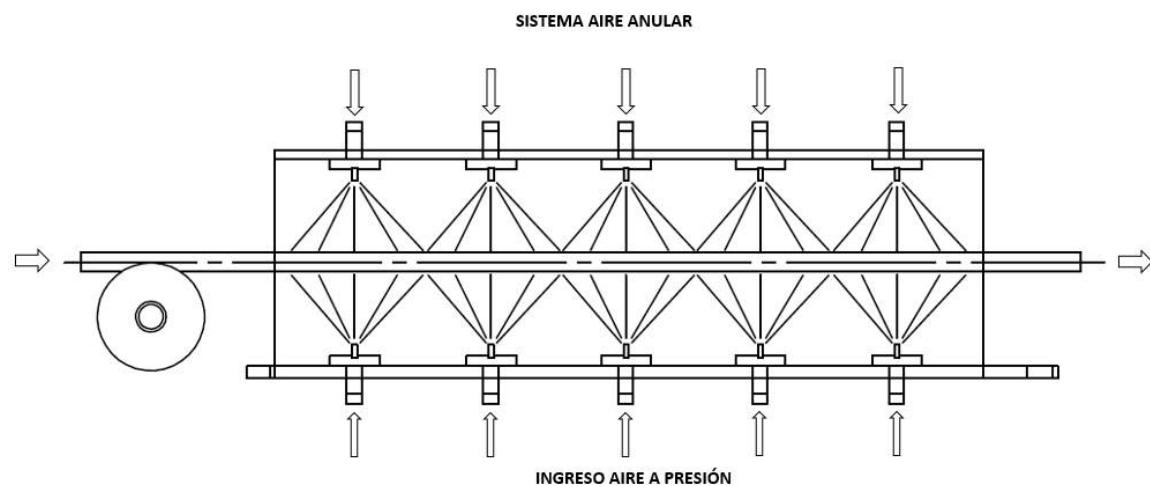


Figura 3-16: Sistema de enfriamiento solución 2.

- **Sistema de tracción y almacenado:**

Cintas enfrentadas: 2 orugas enfrentadas que traccionan el alambre. Al tener mayor superficie de contacto que los rodillos anteriores la presión superficial sería menor. Las mismas pueden regularse en altura para variar la presión ejercida.

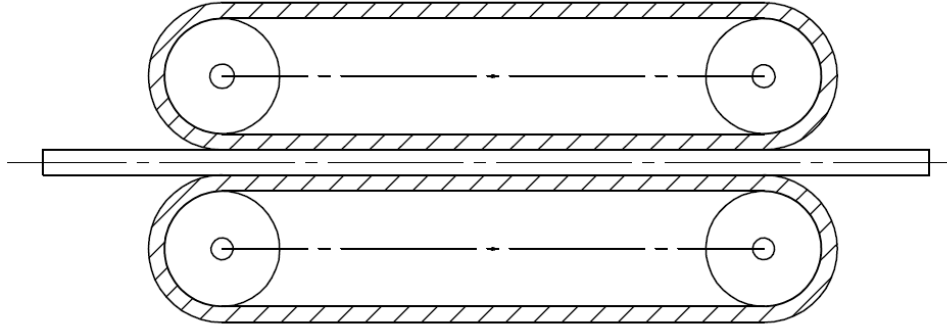


Figura 3-17: Sistema de tracción almacenado.

3.2.2.3 Solución 3

- Sistema cabezal de extrusión:

En la siguiente imagen se muestra la tercera propuesta de solución, se puede observar el sistema de aire para el centrado del electrodo, la válvula anular de desplazamiento longitudinal para la regulación de la apertura del canal (accionado mediante una palanca) y las resistencias eléctricas para mantener la temperatura.

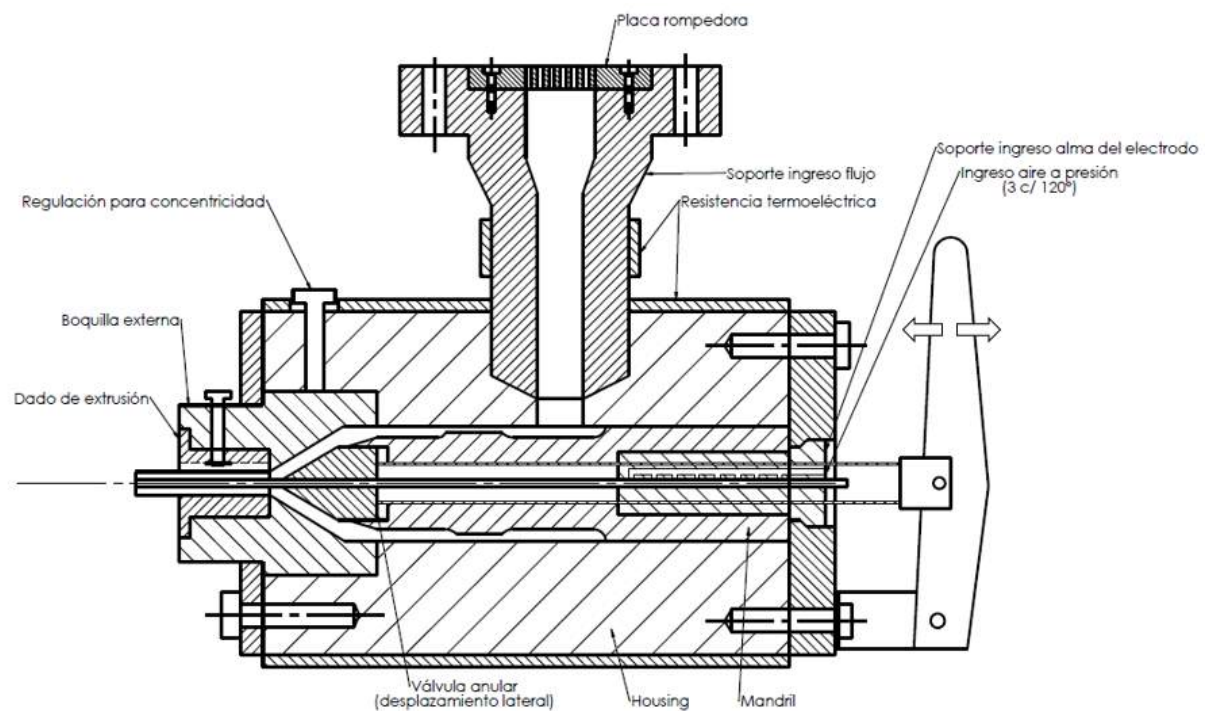


Figura 3-18: Propuesta 3, cabezal de extrusión.

- **Sistema de enfriamiento**

Compuesto por un sistema anular con aire:

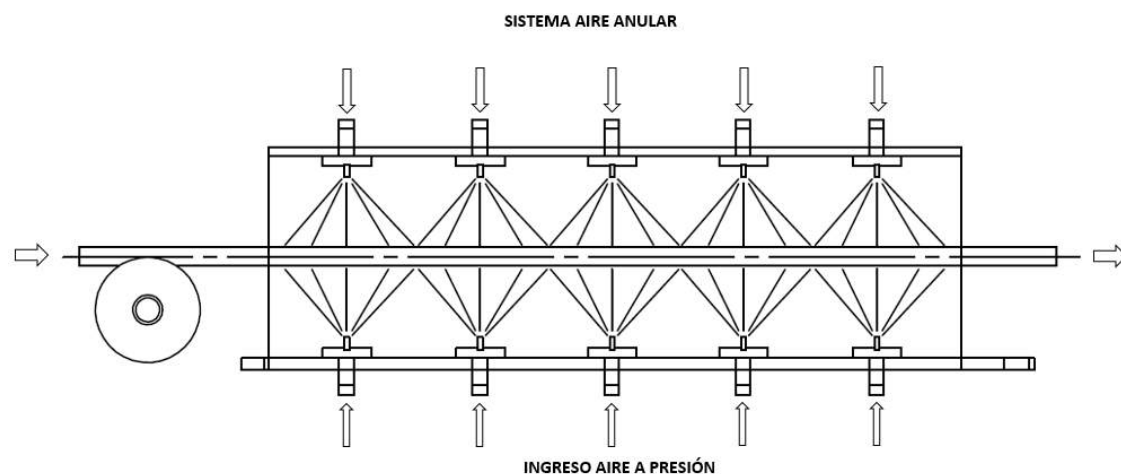


Figura 3-19: Sistema de enfriamiento anular con aire.

- **Sistema de tracción y almacenado**

Cintas enfrentadas

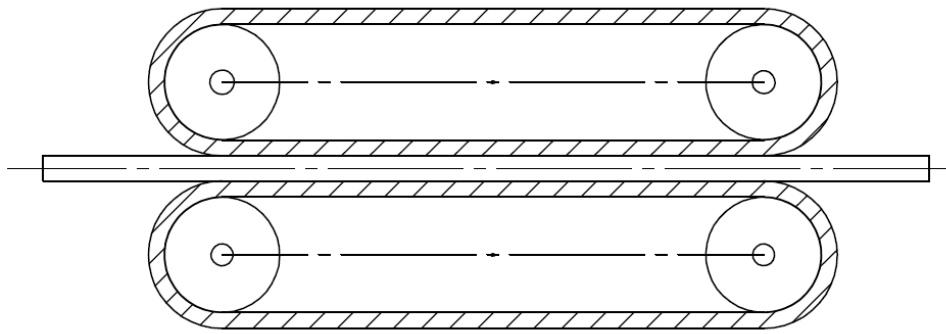


Figura 3-20: Sistema de traccionado con cintas regulables.

3.2.2.4 Solución 4

- Sistema cabezal de extrusión:

Se muestra la propuesta solución, se puede apreciar las resistencias internas para mantener la temperatura, las boquillas internas intercambiables para la regulación del canal de extrusión (regulación de la caída de presión) y las unidades de centrado del electrodo como característica, a diferencia de los anteriores.

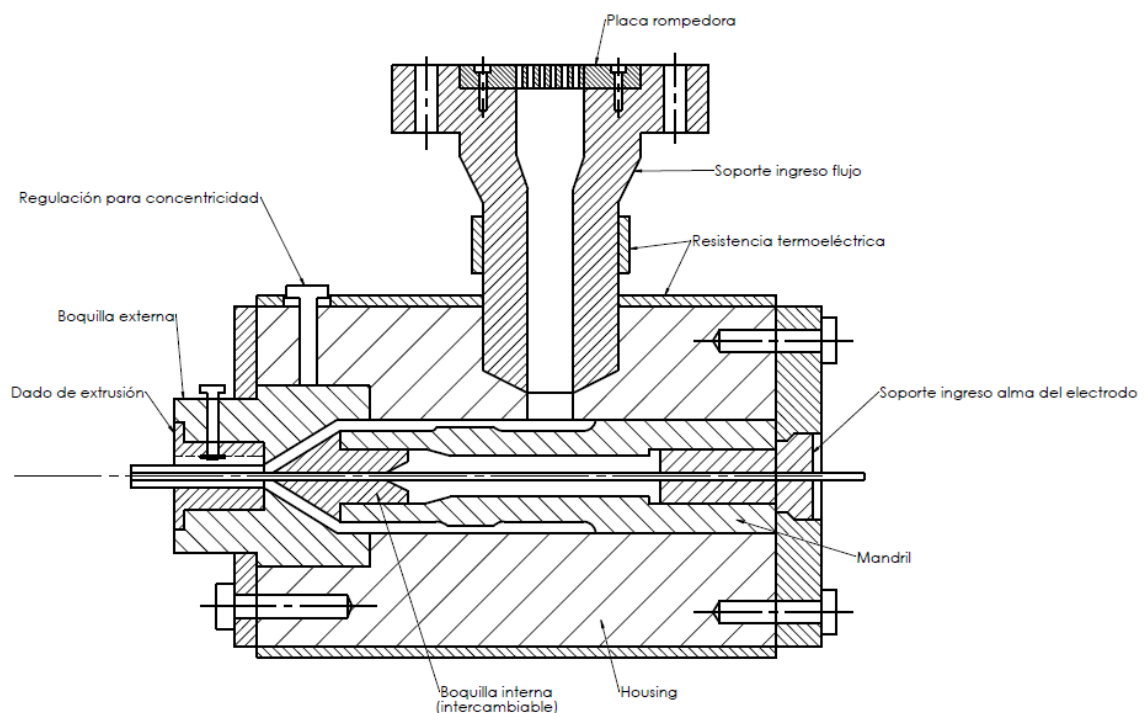


Figura 3-21: Solución 4, cabezal de extrusión.

- Sistema de enfriamiento:

Lluvia de aire + agua: se utiliza el mismo sistema con boquillas mencionado en la propuesta 2 pero se introduce aire para que sea transportada en el aire inyectado.

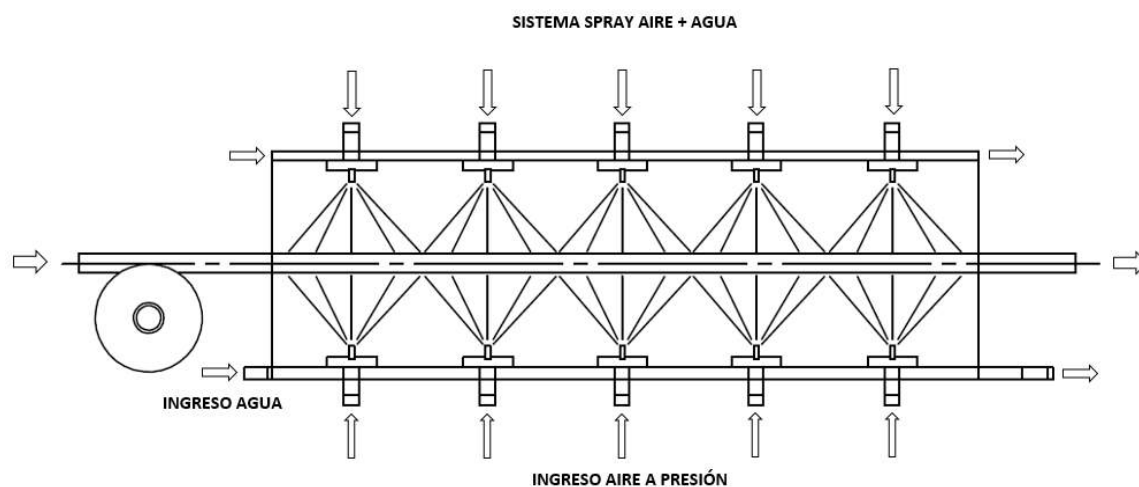


Figura 3-22: Sistema de enfriamiento con lluvia de agua+aire (spray)

- Sistema de tracción y almacenado

Cintas enfrentadas

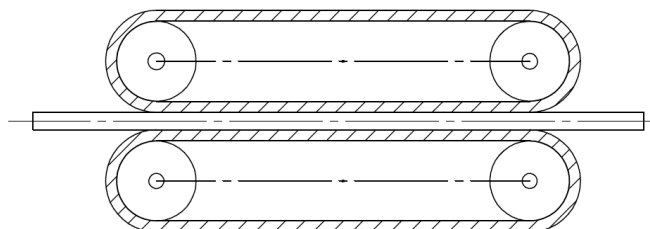


Figura 3-23: Sistema de traccionado con cintas regulables.

3.2.2.5 Solución 5

- Sistema cabezal de extrusión:

En este caso, la boquilla interna posee la característica de poder desplazarse lateralmente a partir de su unión roscada con el mandril. Sacando la tapa de seguridad es posible roscar y desenroscar la misma, otorgando el movimiento que permite ajustar la caída de presión en el canal extrusor. Por su parte, el centrado del alambre en el cabezal es realizado por 2 dispositivos intercambiables colocados en la boquilla interna, posibilitando el ingreso de alambres de diferentes diámetros en caso que se necesite.

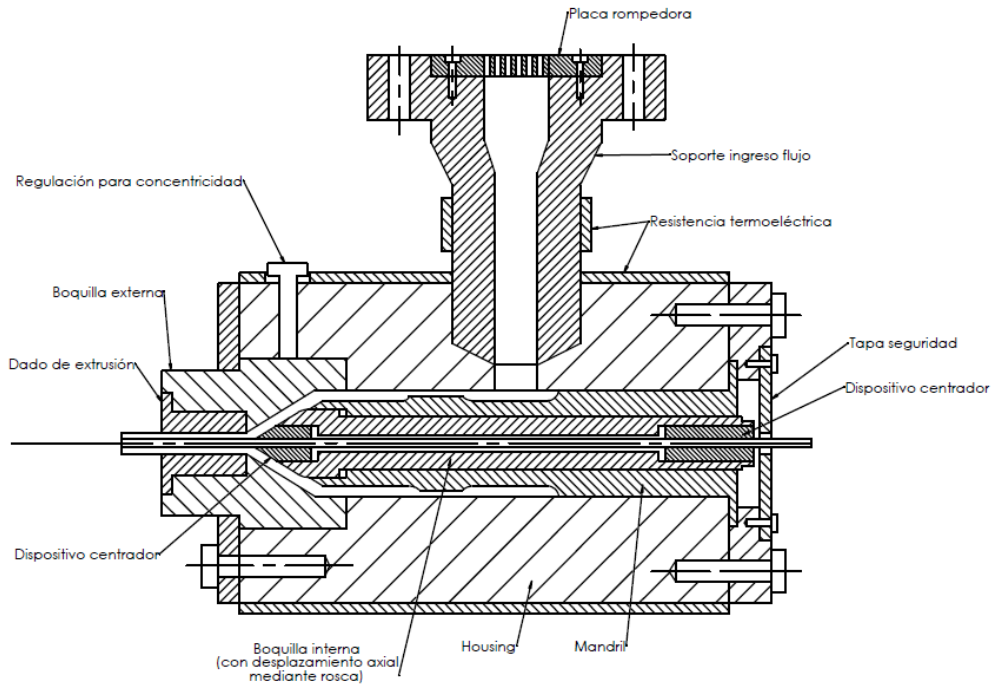


Figura 3-24: Solución 5.

- Sistema de enfriamiento

El enfriamiento se realiza en una tina de agua a temperatura ambiente.

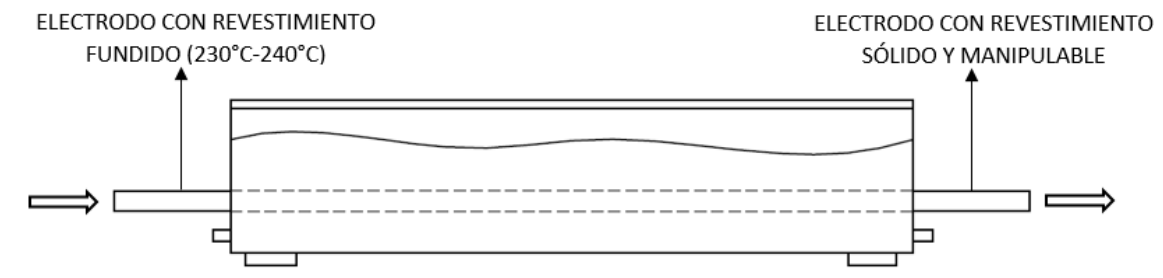


Figura 3-25: Tina de enfriamiento.

- Sistema de tracción y almacenado

En esta solución, para el sistema de tracción se propone utilizar, luego de la salida del electrodo del sistema de enfriamiento, un par de ruedas con radio centradoras para que el electrodo pueda pasar de manera centrada por la herramienta que realizará la ranura del revestimiento (para poder colocar la punta de la soldadora) y posteriormente el sistema de cintas regulables anteriormente presentado.

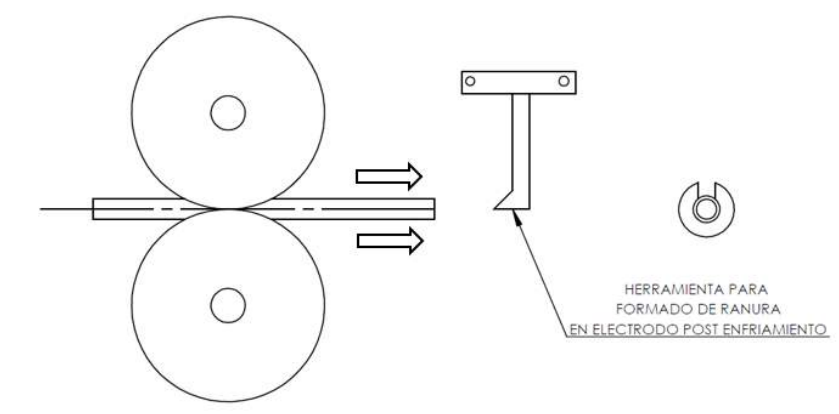


Figura 3-26: Ruedas enfrentadas para el centrado del electrodo.

3.2.3 Método de ponderación y elección de la solución

Una vez obtenidas las diferentes soluciones anteriormente mostradas, se procede a utilizar el método de ponderación de las soluciones para poder seleccionar la más adecuada para el desarrollo de ingeniería de detalle de la misma.

El método de ponderación de las soluciones o **método de los factores ponderados**, consta en la evaluación de las alternativas en función de diferentes criterios determinados por los ingenieros.

En primer lugar, se definen los criterios a utilizar para la evaluación de las alternativas y su peso relativo en el porcentaje global, como se observa a continuación:

CRITERIO	FACILIDAD DE FABRICACIÓN	EFICIENCIA DE RECURSOS	FACILIDAD DE MONTAJE	EFICIENCIA DE ENFRIAMIENTO	$\Sigma+1$	PONDERACIÓN
FACILIDAD DE FABRICACIÓN		1	1	1	4	0.4
EFICIENCIA DE RECURSOS	0		1	0.5	2.5	0.25
FACILIDAD DE MONTAJE	0	0		0	1	0.1
EFICIENCIA DE ENFRIAMIENTO	0	0.5	1		2.5	0.25

Figura 3-27: Ponderación de los criterios.

Dentro de los criterios establecidos se puede observar que el más importante entre los mismos es la facilidad de fabricación de la solución en cuestión (40% del total), teniendo en cuenta los componentes y su proceso de fabricación específico. Esto es importante para poder construir un diseño que sea factible de fabricar y posea procesos convencionales de fabricación, sin necesidad de implementar recursos con gran costo. Los próximos criterios, con un 25% de importancia cada uno, son la eficiencia de los recursos utilizados y la eficiencia de enfriamiento. Con la primera se hace referencia a la cantidad y calidad de componentes y sistemas utilizados en la construcción del sistema global. Utilizar sistemas que posean propósitos múltiples y

puedan ser modificados implica un alto puntaje en este criterio. Por parte de la eficiencia de enfriamiento, implica que el fundido pueda enfriarse en el menor tiempo posible y utilizando la menor cantidad de elementos posibles con la menor demanda de energía (eficiencia de recursos). Por último, la facilidad de montaje equivale a un 10% del total, en donde se obtiene este valor debido a la complejidad que de antemano se sabe que provoca el ensamble de un cabezal de extrusión y su calibración.

La confección de esta tabla se realiza evaluando cada criterio en un versus en donde si el criterio ubicado en la fila posee mayor importancia relativa que el criterio de la columna, se coloca un 1. En caso de que sea de menor importancia se coloca el 0 y, en caso de que ambas posean la misma importancia relativa, se coloca 0.5. El desarrollo podrá observarse en el [Anexo A: Memoria de cálculo](#).

Este método de ponderación tiene la característica de poder utilizarse tanto a nivel global de soluciones como también aplicarse a subsistemas e inclusive componentes entre las alternativas de solución. En este caso, se optó por aplicar el mismo a las soluciones anteriormente generadas, y en la evaluación de los criterios los resultados fueron los siguientes:

1- Criterio Facilidad de fabricación, resultó más adecuada la **solución 5**.

EVALUACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO FACILIDAD DE FABRICACIÓN							
	SOLUCIÓN 1	SOLUCIÓN 2	SOLUCIÓN 3	SOLUCIÓN 4	SOLUCIÓN 5	$\Sigma+1$	PONDERACIÓN
SOLUCIÓN 1		0	1	0	0	2	0.13
SOLUCIÓN 2	1		1	0	0	2.5	0.17
SOLUCIÓN 3	0	0		0	0	1.5	0.10
SOLUCIÓN 4	1	1	1		0	4	0.27
SOLUCIÓN 5	1	1	1	1		5	0.33
					SUMA	15	1.00

Figura 3-28: Ponderación según criterio 1.

2- Criterio Eficiencia de recursos, resultó más adecuada la **solución 1**.

	SOLUCIÓN 1	SOLUCIÓN 2	SOLUCIÓN 3	SOLUCIÓN 4	SOLUCIÓN 5	$\Sigma+1$	PONDERACIÓN
SOLUCIÓN 1		1	0.5	1	0.5	4	0.286
SOLUCIÓN 2	0		0.5	1	0	2.5	0.179
SOLUCIÓN 3	0.5	0.5		1	0	3	0.214
SOLUCIÓN 4	0	0	0		0	1	0.071
SOLUCIÓN 5	0.5	1	0.5	1		3.5	0.250
					SUMA	14	1.000

Figura 3-29: Ponderación según criterio 2.

3- Criterio Facilidad de montaje: resultó más adecuada la **solución 5**.

EVALUACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO FACILIDAD DE MONTAJE							
	SOLUCIÓN 1	SOLUCIÓN 2	SOLUCIÓN 3	SOLUCIÓN 4	SOLUCIÓN 5	Z+1	PONDERACIÓN
SOLUCIÓN 1		0.5	0	0	0.5	1.5	0.1
SOLUCIÓN 2	0.5		0	0	0	1.5	0.1
SOLUCIÓN 3	1	1		0	0	3	0.2
SOLUCIÓN 4	1	1	1		0	4	0.27
SOLUCIÓN 5	1	1	1	1		5	0.33
					SUMA	15	1

Figura 3-30: Ponderación según criterio 3.

4- Criterio Eficiencia de enfriamiento, resultó más adecuada la **solución 5**.

En este caso se eligió hacer otra ponderación dentro del mismo criterio para darle diferente importancia a los distintos aspectos. El enfriamiento en sí, es decir el calor extraído por unidad de tiempo, y la eficiencia de los recursos utilizados (cantidad de sistemas involucrados, utilización del mismo fluido en otros componentes) son los más relevantes (aporta el 40% cada uno). En último lugar se encuentra el % de humedad remanente en el electrodo, luego del proceso de enfriamiento, que luego será extraído en el proceso posterior de secado convencional (fuera del alcance de este proyecto).

EVALUACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO EFICIENCIA DE ENFRIAMIENTO (0.4 - Enfriamiento en sí, 0.4 - Eficiencia recursos utilizados, 0.2 - % humedad remanente en el electrodo luego del enfriamiento)							
	SOLUCIÓN 1	SOLUCIÓN 2	SOLUCIÓN 3	SOLUCIÓN 4	SOLUCIÓN 5	Z+1	PONDERACIÓN
SOLUCIÓN 1		0.4	0.4	0.4	0.5	2.7	0.18
SOLUCIÓN 2	0.6		0.5	0.2	0.2	2.5	0.17
SOLUCIÓN 3	0.6	0.5		0.2	0.2	2.5	0.17
SOLUCIÓN 4	0.6	0.8	0.8		0.2	3.4	0.23
SOLUCIÓN 5	0.5	0.8	0.8	0.8		3.9	0.26
					SUMA	15	1.00

Figura 3-31: Ponderación según criterio 4.

Para poder realizar una evaluación entre los tipos de enfriamiento propuestos y poder así obtener ponderaciones numéricas de selección, reflejadas en el anterior cuadro, se realizaron cálculos numéricos y simulaciones para poder así visualizar factores tales como eficiencia de enfriamiento, largo total del sistema, cantidad de recursos empleados, entre otros.

A continuación, se muestra una comparación entre los resultados obtenidos en el cálculo del enfriamiento del electrodo post extrusión:

Tabla 3-7: Comparación de resultados

Comparación resultados	T centro pp [°C]	T ext. pp [°C]
Agua	57.67	21.35
Aire	97.25	49.08
Lluvia de agua	60.37	26.18
Tiempo de enfriamiento del electrodo (T): 60 segundos		
Posición del electrodo en el sistema de enfriamiento al tiempo T: 3 m		

Los cálculos efectuados y simulaciones se podrán observar en el [Anexo: Memoria de cálculo](#).

A partir de las ponderaciones, criterios y cálculos efectuados, el tipo de enfriamiento mediante el ingreso del electrodo en una tina de agua a temperatura ambiente resulta el más correcto para este caso. Por lo tanto, no serán necesarios dispositivos de manifolds que distribuyan el aire a presión o produzcan la forma de lluvia de agua laminar para el enfriamiento del electrodo (eficiencia de recursos).

Para finalizar, y llegar a una conclusión, se realizó la ponderación para cada solución. Es decir, se sumaron los valores ponderados de la evaluación según cada criterio.

$$\sum_{m=1}^4 \text{Ponderación solución } m \text{ según criterio } n) \times (\text{ponderación global del criterio } n) \quad (3.3)$$

CONCLUSIONES						
CRITERIO	FACILIDAD DE FABRICACIÓN	EFICIENCIA DE RECURSOS	EFICIENCIA DE ENFRIAMIENTO	FACILIDAD DE MONTAJE	Σ	PRIORIDAD (%)
SOLUCIÓN 1	0.053	0.071	0.045	0.010	0.180	17.976
SOLUCIÓN 2	0.067	0.045	0.042	0.010	0.163	16.298
SOLUCIÓN 3	0.040	0.054	0.042	0.020	0.155	15.524
SOLUCIÓN 4	0.107	0.018	0.057	0.027	0.208	20.786
SOLUCIÓN 5	0.133	0.063	0.065	0.033	0.294	29.417
			SUMA		1.0	100.0

Figura 3-32: Ponderación final.

La **solución 5** resulta ser la elegida para llevar a cabo el desarrollo del proyecto ya que es la que cumple en mayor medida con todos los requisitos.

Capítulo 4: Desarrollo de la solución adoptada

En el siguiente capítulo se mostrará la ingeniería de detalle y el proceso de diseño de la solución adoptada, mostrando detalles y conformación general del **sistema de cabezal de extrusión y sistema de enfriamiento**.

Se mostrará un resumen de los componentes dimensionados y la posterior validación de los mismos a partir de simulaciones efectuadas con SolidWorks, pudiendo encontrar los cálculos manuales en el [Anexo A: Memoria de cálculo](#).

4.1 Parámetros previos al diseño

Previamente a comenzar con el detalle de los dimensionamientos y diseños realizados para el cabezal de extrusión y tina de enfriamiento, se deben definir parámetros que serán utilizados como datos de entrada para el desarrollo del diseño.

Entre estos parámetros, serán de incumbencia datos como diámetro de tornillo, presión máxima generada por la extrusora, velocidad de extrusión y materiales para el diseño de los componentes.

4.1.1 Datos de la máquina extrusora

Dentro de los datos de la máquina extrusora, es necesario conocer parámetros del tornillo de extrusión, los cuales permitirán el cálculo de, por ejemplo, la presión máxima que se genera en la máquina extrusora.

4.1.1.1 Tornillo de extrusión

Para el tornillo de la máquina se establece un tornillo de 1 hélice, siendo esta la configuración más común para los fines utilizados, además de tener en cuenta la escala a fabricar (escala de laboratorio). A continuación, se detallan diferentes cálculos pertinentes al diseño del tornillo de la extrusora.

Para poder comenzar con los cálculos, se definen los parámetros principales, a partir de la siguiente figura:

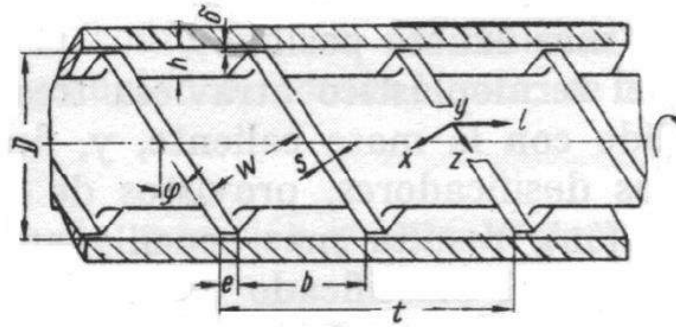


Figura 4-11: Parámetros principales del tornillo, vista general.

Donde:

- h es la profundidad del canal
- W es la anchura del canal
- e la anchura de la cresta del filete
- el ángulo del filete
- δ la holgura entre el tornillo y el cilindro
- D el diámetro del tornillo

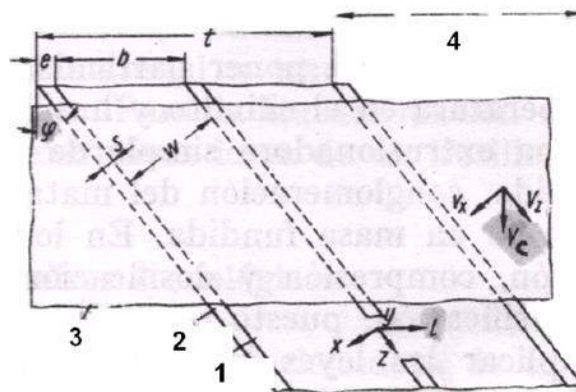


Figura 4-2: Parámetros generales en vista de desarrollo.

La velocidad V_c ($V_c = \pi \times d \times n$), la cual corresponde a la velocidad circunferencial del cilindro, es posible de descomponer en 2 componentes, V_z , la cual va en la misma dirección que el desarrollo del filete, y V_x , la cual va perpendicularmente al desarrollo del filete. La velocidad de cualquier partícula V_c es posible de calcular a partir de estas 2 variables mencionadas, en la dirección X y Z.

La velocidad de la masa fundida se descompone sólo en un plano que contiene a las direcciones X y Z, correspondiendo a transversal y longitudinal al desarrollo del canal. La velocidad V_x provoca el movimiento de la masa fundida en dirección Y a una velocidad V_y . Esta velocidad es mayor en las paredes delanteras y traseras del canal, donde la masa fundida que corre en dirección transversal cambia el sentido de la corriente. Debido a que a componente V_y surge solamente a consecuencia del cambio de velocidad V_x correspondiente a la corriente transversal, el efecto de V_x en la producción se puede despreciar. Por este motivo, se considera $V_y = 0$.

En general, los siguientes cálculos y fórmulas son expresados por el investigador Savgorodny en su libro "Transformación de Plásticos" [4].

4.1.1.1.1 Ángulo de hélice

El ángulo de hélice se puede calcular como:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{t}{\pi D} \quad (4.1)$$

Donde:

D = Diámetro de la variable del tornillo

t = Paso del tornillo

Para este diseño, se tomará un paso igual al diámetro, como generalmente se utiliza para la simplificación de los cálculos. De esta manera, el cálculo queda:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{1}{\pi}$$

$$\varphi = 17,65^\circ$$

Se toma el paso igual al diámetro debido a que, para tornillos con profundidades bajas de canal, el ángulo varía muy poco. De esta manera, el ángulo considerando el diámetro igual al paso, resulta el mínimo.

4.1.1.1.2 Relación L/D

Uno de los parámetros más importantes en el diseño del tornillo es la relación entre el largo y el diámetro del mismo. Tanto la producción como la aplicación de la extrusora dependen del diámetro del husillo, de la relación L/D, de la velocidad de giro y de las características del canal, perfil de los filetes, número de zonas, entre otros.

Generalmente, para transformación de plásticos se emplean extrusoras con tornillos de 9 a 580 mm, y una relación que varía de $L/D = (6 \text{ a } 40) : 1$, siendo lo más común una relación de entre $(20 \text{ a } 30):1$. La definición de la relación dependerá del tipo de utilización que se requiera, además de las características del material a extruir. En general, para extrusiones de tuberías o recubrimientos se utilizan relaciones de L/D más cortas y rápidas.

A partir de la investigación del estado del arte, donde se pudieron encontrar diversos diseños actuales de extrusoras de tornillos de escala de laboratorio, se propone utilizar un diámetro de 30 mm, teniendo como objetivo poder alcanzar un caudal de producción que ronde los 15 Kg/h como máximo. De esta manera, se puede corroborar lo establecido a partir de las sendas imágenes que se encuentran en el apartado de investigación del estado del arte. En general, las extrusoras poseen un diámetro de 30/32 mm y una relación L/D de 25 a 30, obteniendo un caudal de entre 6 y 15 kg/h dependiendo de la potencia del motor utilizado.

Resumiendo, los parámetros adoptados son los siguientes:

- **Relación L/D = 25**
- **Diámetro del tornillo impuesto = 30 mm**
- **Longitud del tornillo = 750 mm**

4.1.1.1.3 Paso del tornillo

Para calcular el paso del tornillo es posible realizarlo mediante la siguiente ecuación, a partir de los criterios establecidos por el investigador Savgorodny:

$$\begin{aligned}
 t &= \pi x D_x \tan \varphi \\
 t &= \pi x 30x \tan 17,65^\circ \\
 t &= 29,99mm \cong 30mm
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

Lo cual condice con el criterio de establecer un paso igual al diámetro del tornillo, establecido anteriormente para el cálculo del ángulo de hélice.

4.1.1.1.4 Espesor de filete

Para el cálculo del espesor de filete se utiliza la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned}e &= 0,1xD \\e &= 0,1 \times 30mm \\e &= 3mm\end{aligned}\quad (4.3)$$

4.1.1.1.5 Holgura tornillo/cilindro

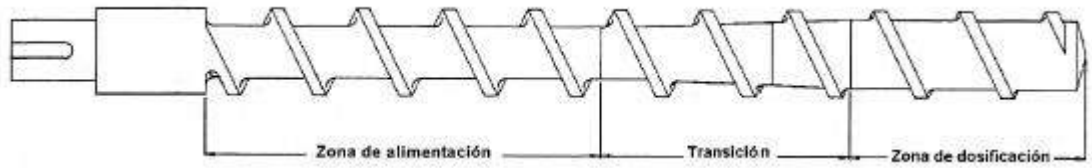
Tiene mucha importancia en el trabajo de la extrusora la medida de la holgura entre la cresta del filete del tornillo y la superficie interior del cilindro. Cuando esta medida es grande, el material se mezcla con mayor efectividad, pero disminuye el avance del mismo por aumentar el flujo inverso del material.

Según Savgorodny [4], la holgura entre el filete y el cilindro se puede calcular como:

$$\begin{aligned}\delta &= 0,002xD \\\delta &= 0,002 \times 30mm \\\delta &= 0,06mm\end{aligned}\quad (4.4)$$

4.1.1.1.6 Zonas del tornillo y longitudes

Las longitudes de las etapas del tornillo (alimentación, compresión y dosificación) dependen principalmente del material a extruir. A modo de simplificación, y teniendo en cuenta los diferentes diseños de longitudes de tornillos, se establecerán las siguientes dimensiones, ya que debido a la largura del tornillo establecida es posible de efectuar una división cuasi igualitaria para cada proceso para que las condiciones de transformación se cumplan correctamente.



$$L_{\text{alimentación}} = L / 2 = 450\text{mm}$$

$$L_{\text{compresión}} = L / 4 = 225\text{mm}$$

$$L_{\text{dosificación}} = L / 4 = 225\text{mm}$$

Figura 4-3: Zonas del tornillo.

4.1.1.1.7 Profundidades de filetes - Relación de compresión

Otro parámetro importante para el tornillo es la relación de compresión del mismo. En este caso, la relación de compresión se determina a partir de la relación entre las profundidades del tornillo entre la zona de alimentación y dosificación, debido a que en este caso se diseña un tornillo con profundidades variables en los filetes. Otra manera, pero menormente utilizada, es partir de la construcción de un tornillo con paso variable, donde el paso del mismo sea menor a medida que se acerca a la zona de dosificación, pero esta manera implica una forma de construcción más compleja.

Los cálculos para la profundidad del filete son los siguientes:

$$\begin{aligned} h_{\text{max}_{\text{zona alimentación}}} &= 0,2xD \\ h_{\text{max}_{\text{zona alimentación}}} &= 0,2 \times 30 \text{ mm} \\ h_{\text{max}_{\text{zona alimentación}}} &= 6 \text{ mm} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Procurando las relaciones de compresión necesarias, las mismas se establecen según el material a transformar. A continuación, se puede ver una tabla con las más utilizadas para los diferentes materiales más utilizados en la extrusión

Low-compression screw (1.2 – 1.8 compression ratio)	Acrylics Acrylic multipolymer ABS and SAN Polyvinyl chloride, rigid
Medium-compression screw (2.0 – 2.8 compression ratio)	Acetal (Delrin 100) Cellulosics (acetate, propionate) Nylon (low melt index) Phenylene oxide-based resin (Noryl) Polycarbonates Polyethylene (medium to low melt index) Polypropylene (medium to low melt index) Polystyrene (crystal and impact) Polyvinyl chloride (flexible)
High-compression screw (3 – 4.5 compression ratio)	Acetal (Delrin 500 and 900; Celcon) Fluoroplastics (Teflon 110) Nylon (high melt index) Polyethylene (high density) Polyethylene (high melt index) Polypropylene (medium to high melt index)

Figura 4-4: Relaciones de compresión.

Para la mezcla de materiales que serán utilizados en la extrusión, se utilizará una relación de compresión media, adoptando un valor de 3. Por lo tanto, la profundidad del canal en la dosificación será:

$$R_{\text{compresión}} = \frac{h_{\text{zona alimentación}}}{h_{\text{zona dosificación}}} = 3$$

$$h_{\text{zona dosificación}} = \frac{h_{\text{zona alimentación}}}{3} = \frac{6 \text{ mm}}{3}$$

$$h_{\text{zona dosificación}} = 2 \text{ mm}$$

4.1.1.1.8 Cantidad de filetes

La cantidad de filetes puede ser calculado como:

$$\text{Cant Filetes} = \frac{L}{D}$$

$$\text{Cant Filetes} = \frac{900 \text{ mm}}{30 \text{ mm}}$$

$$\text{Cant Filetes} = 30 \text{ filetes} \quad (4.6)$$

4.1.1.2 Flujos unitarios

4.1.1.2.1 Flujo unitario de arrastre Q_d

$$Q_d = \frac{\pi \cdot m \cdot D \cdot h_1 \cdot \left(\frac{t}{m} - e \right) \cdot \cos^2 \phi}{2}$$

$$Q_d = \frac{\pi \cdot 1 \cdot 30mm \cdot 2mm \cdot \left(\frac{30mm}{1} - 3mm \right) \cdot \cos^2 17,65}{2}$$

$$Q_d = 2310,753 \text{ mm}^3 \quad (4.7)$$

Donde:

D = Diámetro del tornillo

h_1 = profundidad del canal en la zona de dosificación

ϕ = ángulo del filete

m = número de canales del tornillo

e = anchura de la cresta del filete

4.1.1.2.2 Flujo unitario de retroceso Q_p

$$Q_p = \frac{m \cdot h_1^3 \cdot \left(\frac{t}{m} - e \right) \cdot \sin \phi \cdot \cos^2 \phi}{12 \cdot L}$$

$$Q_p = \frac{1 \cdot (2mm)^3 \cdot \left(\frac{30mm}{1} - 3mm \right) \cdot \sin(17,65) \cdot \cos(17,65)}{12 \times 750mm}$$

$$Q_p = 0,006934 \text{ mm}^3 \quad (4.8)$$

4.1.1.2.3 Flujo unitario de infiltración QI

$$QL = \frac{\pi^3 \cdot D^3 \cdot \delta^3 \cdot \tan \varphi}{10 \cdot e \cdot L}$$

$$QL = \frac{\pi^3 \cdot (30mm)^3 \cdot (0,06mm)^3 \cdot \tan(17,65)}{10 \cdot 3mm \cdot 750mm}$$

$$QL = 0,0004522mm^3 \quad (4.9)$$

4.1.1.3 Velocidad de rotación del tornillo

Las revoluciones del tornillo dependen directamente de la velocidad de cortadura, el diámetro del tornillo y la profundidad del canal en la zona de dosificación. A partir de la siguiente fórmula, es posible expresar la velocidad de cortadura en el proceso:

$$\dot{\gamma} = \frac{\pi \cdot D \cdot \eta}{h_{dosificación} \times 1s} \quad (4.10)$$

Donde:

es la velocidad de cortadura, en 1/s

es la velocidad de rotación del tornillo

D es el diámetro del tornillo

$h_{dosificación}$ es la profundidad del canal en la zona de dosificación

A partir de esta fórmula, y conociendo el rango de velocidades de corte generales para los polímeros más utilizados, es posible despejar la velocidad de rotación, cuya fórmula queda:

$$\eta = \frac{\dot{\gamma} \cdot h_{dosificación} \cdot s}{\pi \cdot D} \times \frac{60s}{1min} \quad [Rev/min] \quad (4.11)$$

Para un rango de velocidades de corte de 100 [1/s] a 1000 [1/s] para los procesos de extrusión en tornillos, se puede mostrar la siguiente gráfica, confeccionada para el rango de velocidades de corte y un diámetro de 30 mm.

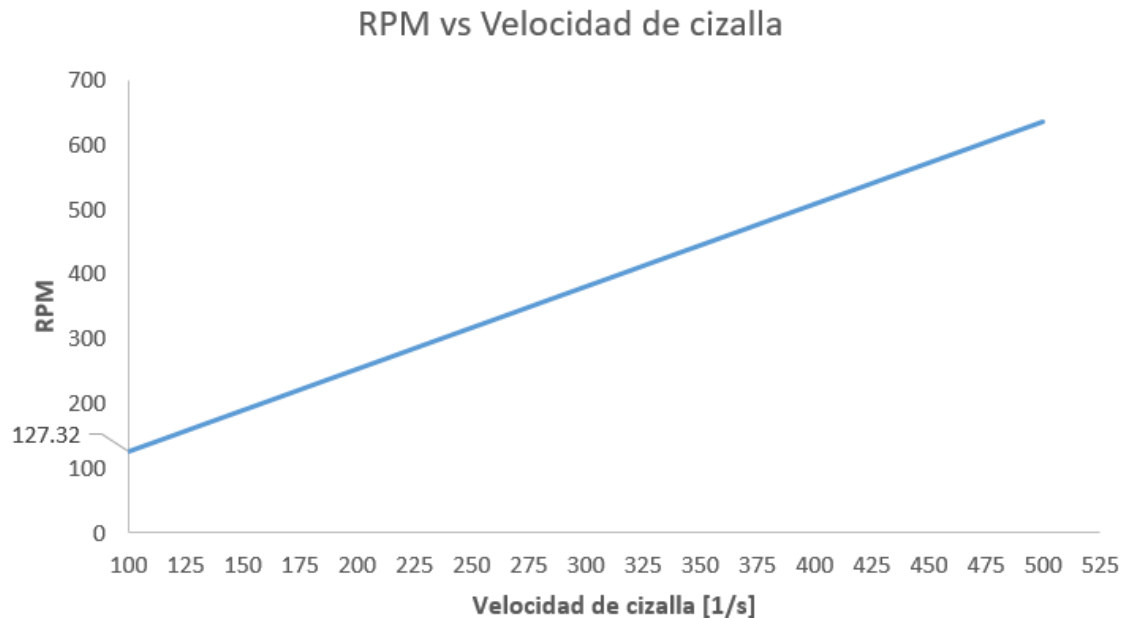


Figura 4-5: RPM vs Velocidad de cizalla.

Como se expresa en el marco teórico, el rango de velocidades de cizalla para extrusión en la zona de tornillos, se recomienda entre 10^2 a 10^3 s⁻¹. Al tener menor velocidad de cizalla, la velocidad de rotación es menor.

Adoptando una velocidad de cizalla de 111 s⁻¹, la velocidad de giro del tornillo resulta en 141 RPM.

A su vez, la viscosidad promedio a lo largo del tornillo resulta de 400 Pa.s para el polímero utilizado, según la gráfica de viscosidad vs velocidad de cizalla:

Tabla 4-1: Parámetros del material

Vel cizalla promedio	111	s-1
RPM promedio	2.355493158	rps
	141.3295895	RPM
Viscosidad promedio en tornillo	400	Pa.s

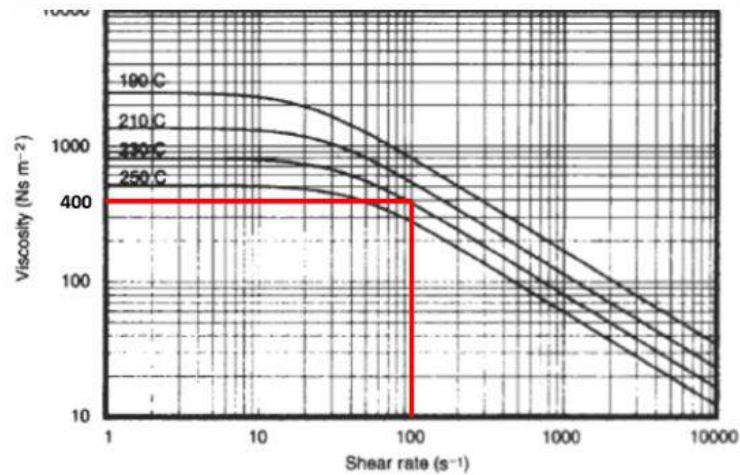


Figura 4-6: Viscosidad vs velocidad de cizalla.

4.1.1.4 Potencia del sistema

La potencia es la rapidez con la que se efectúa un trabajo, es decir, el trabajo por unidad de tiempo. A partir de las fórmulas expresadas por Savgorodny, es posible determinar la potencia del sistema, la cual es proporcional al diámetro y las revoluciones por minuto del tornillo. Las mismas se pueden calcular de la siguiente manera, a partir de la definición de las RPM necesarias para el sistema:

$$\eta = \frac{K^2 \cdot N}{\pi \cdot D^3} \quad [\text{RPM}] \quad (4.12)$$

Donde:

K^2 es la constante de proporcionalidad = 66,7

N = Potencia del sistema

D = Diámetro del tornillo

Entonces:

$$N = \frac{\eta \cdot \pi \cdot D^3}{K^2} \quad [\text{Kw}] \quad (4.13)$$



Figura 4-7: Potencia requerida vs RPM.

Se observa que la potencia necesaria del sistema para el rango de RPM utilizado (para extrusión se toma como rango general 50 - 150 RPM) será menor a 3 KW.

4.1.1.5 Presiones del sistema

La presión que se obtiene en el proceso de extrusión es importante, debido a que a partir de la misma se puede aplicar el revestimiento del material sobre el alma de acero del electrodo.

Para el cálculo de la presión, se deben tener en cuenta los siguientes factores, según el investigador Savgorodny:

$$P_{\max} = \frac{6 \times \pi \times D \times L \times N \times \mu}{h_{dos}^2 \times \tan \varphi} \quad [\text{Mpa}] \quad (4.14)$$

Donde:

- D es el diámetro del tornillo
- L es la longitud del tornillo
- N es la velocidad del tornillo, en rps
- μ es la viscosidad efectiva del material a extruir

- h_{dos} es la profundidad en la zona de dosificación

Entonces, colocando los valores conocidos del tornillo, y utilizando una viscosidad promedio de 400 Pa.s, se obtiene:

$$P_{\max} = \frac{6 \times \pi \times 30 \text{ mm} \times 750 \text{ mm} \times 2,1 \frac{\text{rev}}{\text{seg}} \times 400 \text{ pa.s}}{2^2 \text{ mm} \times \tan(17,65)}$$

$$P_{\max} = 313,97 \text{ Mpa} \quad (4.15)$$

Esta presión máxima que ronda los 300 Mpa se utilizará como parámetro de diseño para los cálculos posteriores de espesores y juntas. Esta presión máxima es generada en el excepcional caso de que el sistema se encuentre bloqueado o “tapado” por algún inconveniente, ya sea en el cabezal de extrusión o por acumulación de partículas en la salida del tornillo extrusor. Por lo tanto, esta presión es sólo de referencia ya que el sistema extrusor posee sensores de presión y temperatura en la zona del cilindro y tornillo que informan sobre la situación real del sistema.

Continuando con el análisis de las presiones, es sabido que el sistema extrusor se contempla como una unión entre el sistema de tornillo extrusor y el cabezal de extrusión. Ambos operan en conjunto a una presión de operación. Esta presión de operación es conocida como **punto de operación del sistema**, y es posible de calcular una vez establecidos los parámetros de conductividad (K) del cabezal.

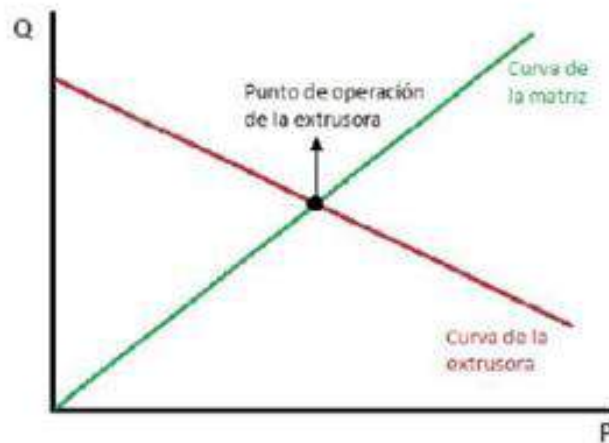


Figura 4-8: Punto de operación.

El punto de operación del sistema implica que tanto el sistema del tornillo como el cabezal extrusor operen para un determinado caudal y una determinada presión de operación.

Como se expresa en el capítulo 1 del proyecto, la presión ejercida en el cabezal para asegurar la correcta colocación del polímero sobre el alma del electrodo, debe ser por lo menos 10 Mpa.

Por lo tanto, a partir de los cálculos de caída de presión y caudal que circula por el cabezal, se debe tener en cuenta que la presión al final del cabezal, debido a la caída de presión, sea superior al valor mínimo establecido (10 Mpa), además de que la producción del tornillo, que se tomará en un valor máximo de 15 Kg/h, sea coincidente con el caudal que circula por el cabezal, evitando zonas de estancamiento y pérdidas de flujo.

En resumen, los cálculos a realizar para el cabezal deben asegurar:

1. Que la presión en la salida del cabezal de extrusión asegure una correcta colocación del fundido sobre el alma del electrodo, obteniendo un valor mínimo de 10 Mpa
2. Que la temperatura a lo largo del cabezal sea la necesaria para mantener el fundido a 230°C
3. Que el caudal de extrusión a lo largo del cabezal coincida con el caudal del tornillo. Para corroborar esto, será necesario calcular las conductividades de cada tramo del cabezal para calcular el caudal circulante y asegurar que no haya zonas de estancamiento/pérdidas de fluido.

Por su parte, es posible calcular la presión de operación del sistema, conociendo las dimensiones de salida del flujo por la boquilla del cabezal (condición de contorno de electrodo diámetro 10 mm) y demás parámetros expresados en la siguiente fórmula [7]:

$$P_{op} = \frac{2 \times \pi \times \mu \times D^2 \times \eta \times h \times \sin \varphi \times \cos \varphi}{\left(\frac{R^4}{2 \times L_d}\right) + \left(\frac{D \times h^3 \times \sin^2 \varphi}{3 \times L}\right)} \quad (4.16)$$

Se utilizan los parámetros del tornillo como largo, velocidad de giro y profundidad de zona de dosificación, anteriormente mencionados.

Por parte de la viscosidad de operación, se sabe que en el cabezal existirá un cambio de viscosidad debido a que las velocidades de corte variarán por el hecho de atravesar diferentes diámetros de canales, por lo que se utiliza una viscosidad de 800 Pa.s como límite superior para el diseño. Posteriormente se podrá observar que dentro del cabezal, las viscosidades de los canales tienden a este valor utilizado, por lo que se encuentra bien dimensionado.

Tabla 4-2: Presión de operación.

P operación	15544093.72	pa
	15.54409372	Mpa
viscosidad op	800	pa.s
R	0.0025	m
Ld	0.05	m
D	0.03	m
h	0.002	m
L	0.75	m

La presión de operación supera los 10 Mpa, y, como se verá más adelante, la caída de presión generada en el cabezal no provoca una disminución del valor de Presión de operación por debajo de los 10 Mpa, por lo que es posible decir que se asegura la correcta colocación del fundido en el alma del electrodo.

En el desarrollo a continuación, se podrá observar los valores de caída de presión y viscosidad para cada tramo del cabezal, además de su factor de conductividad K que será necesario para el cálculo del caudal.

4.1.2 Materiales a utilizar para el diseño de los componentes

A partir de la investigación y búsqueda de información de los diferentes materiales utilizados para la extrusión, se logran definir los tipos de materiales a utilizar.

Como requisitos generales, los aceros utilizados en la extrusión deben cumplir con las siguientes características:

- Deben poder mecanizarse fácilmente, para lograr los canales y moldes específicos para su uso
- Deben ser altamente resistentes a la presión y temperatura
- Ser altamente resistentes a la abrasión y el desgaste, provocado por el flujo de las partículas fundidas del polímero
- Tener suficiente resistencia y tenacidad
- Tener una alta dureza superficial, que permita soportar grandes esfuerzos cortantes provocados por el flujo
- Deben poder pulirse fácilmente, logrando una superficie lisa y libre de imperfecciones, que minimice el esfuerzo de corte
- responder adecuadamente a tratamientos térmicos, para poder obtener la dureza necesaria, sin ocasionar distorsiones y cambios de dimensiones
- Ser resistentes a los ataques químicos (corrosivos)
- Poseer buena conductividad térmica, para poder utilizar elementos calefactores que mantengan la temperatura de extrusión
- Estar libre de tensiones luego de su mecanizado

Una vez conocidos todos los requerimientos para los aceros a utilizar, se puede resumir la búsqueda a un acero que posea:

- un alto límite elástico: para soportar las altas tensiones que son generadas por las presiones y esfuerzos
- que posea un buen comportamiento a los tratamientos térmicos: para poder obtener durezas significativas, del orden de los 50 - 54 HRc

Principalmente con esos requerimientos, es posible acotar la selección, y se selecciona el **Acero 1.2083 (AISI 420 modificado)**, el cual es generalmente utilizado para extrusión, otorgando excelentes cualidades.

En los anexos correspondientes es posible encontrar algunos proveedores y características del acero.

Para los cálculos será utilizado un límite elástico de 1300 N/mm², con una dureza de entre 45 y 50 HRc. El acero debe pasar por una serie de tratamientos térmicos, los cuales serán detallados en los planos de fabricación. En resumen, los mismos son:

- **Recocido blando:** utilizado para poder ablandar y generar un material con buena maquinabilidad
- **Recocido de eliminación de tensiones:** para eliminar tensiones posteriores al mecanizado
- **Temple y Revenido**

4.2 Cabezal de extrusión

Para comenzar con el desarrollo del proceso de diseño realizado para el cabezal de extrusión, debe aclararse que el mismo está efectuado a partir de la investigación y búsqueda de información relacionada a los cabezales de extrusión, pudiendo encontrarse la misma en el capítulo 2: Marco teórico.

Para el desarrollo del cabezal de extrusión deben tenerse en cuenta los **parámetros de entrada** que serán necesarios para poder realizar los cálculos correspondientes en el dimensionamiento de las partes que lo componen.

A partir de la selección del diseño de cabezal realizado anteriormente (capítulo marco metodológico), se parte de la base del conocimiento de la geometría de los conductos que serán parte del cabezal de extrusión.

Como se observa en la siguiente imagen, se representan los 5 sectores por donde la mezcla de extrusión irá fluyendo, hasta llegar a la salida.

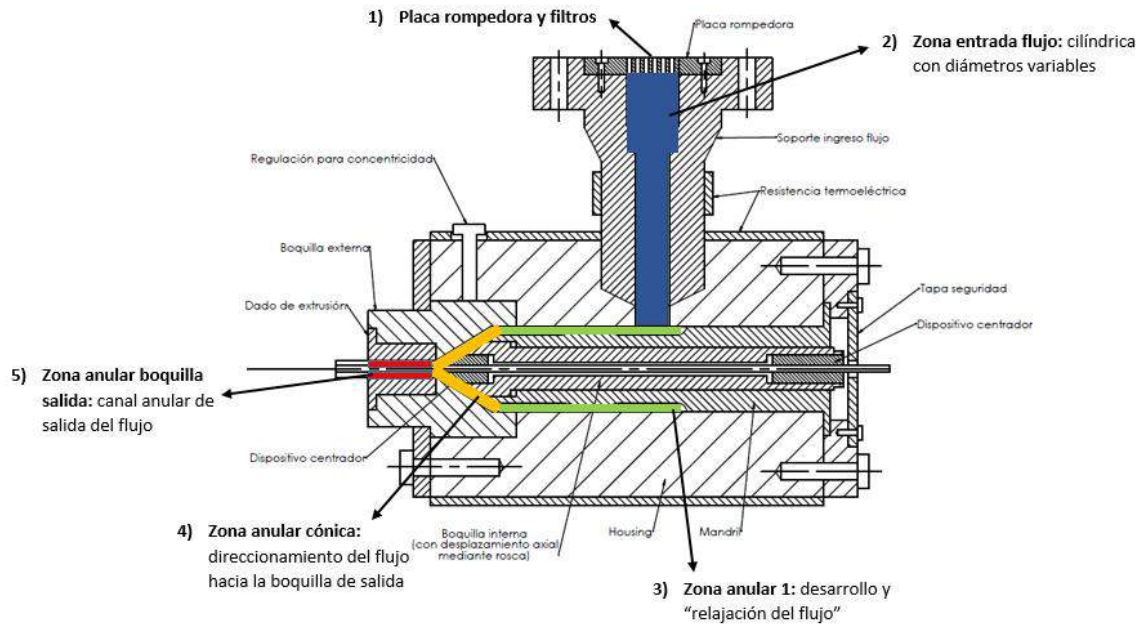


Figura 4-9: Zonas del cabezal.

Tal como se menciona en el marco teórico, cada canal y sección de paso del flujo de extrusión poseerá una caída de presión, un esfuerzo de cizalla y una velocidad de cizalla. Los mismos serán calculados para poder determinar las longitudes, diámetros y secciones que otorguen las caídas de presión y esfuerzos de corte que no excedan el máximo predefinido.

Dentro del diseño del cabezal, además de calcular los diámetros y secciones del mismo, serán calculados los tornillos necesarios para la unión de los componentes, de modo que soporten los esfuerzos máximos de diseño.

Con respecto a la presión máxima de diseño, la misma se genera, independientemente del cabezal a diseñar, en el sector del tornillo y cilindro de la extrusora. A partir de esto, es necesario conocer, además de los parámetros de entrada que a continuación serán mencionados, algunos datos del tornillo que serán de incumbencia para el cálculo de la presión máxima de diseño.

A continuación, se presentará la metodología de cálculo junto a los parámetros necesarios para realizar el dimensionamiento de los canales de extrusión pertenecientes al cabezal.

4.2.1 Dimensionamiento de canales de extrusión

Como anteriormente se mencionó, dentro del pre diseño del cabezal se contemplaron 5 secciones por donde el flujo atravesará con una determinada velocidad,

ocasionando diferentes caídas de presión, velocidades de cizalla y esfuerzos de cizalla que serán calculados para determinar así si los diámetros y secciones impuestas son correctas.

Para poder tener una comprensión más profunda de las fórmulas que se utilizan en los cálculos expresados en el Anexo: Memoria de cálculo, se debe dirigir hacia el capítulo 2: Marco Teórico.

Para el desarrollo de los cálculos se tienen los siguientes datos de entrada:

Tabla 4-3: Datos para el dimensionamiento de los canales de extrusión.

DATOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LOS CANALES DE EXTRUSIÓN		
DENSIDAD DEL POLÍMERO FUNDIDO	770	[Kg/m ³]
PRODUCCIÓN DESEADA	15	Kg/h
	0,004166667	Kg/s
FLUJO VOLUMÉTRICO	0,000005411	m ³ /s
ESFUERZO DE CORTE CRÍTICO (T CRÍTICO)	0,15	Mpa

4.2.1.1 Filtros y plato rompedor

Una vez que el flujo de polímero de extrusión sale del tornillo, se encuentra con las mallas filtrantes y el plato rompedor, que tal como se indica en el Marco Teórico, se utilizan para filtrar partículas y elementos para obtener un diámetro mínimo de partículas fundidas, y además, el plato rompedor con sus canales cilíndricos provoca que el flujo helicoidal proveniente del tornillo se torne en un flujo laminar con dirección hacia el tramo de entrada del cabezal.

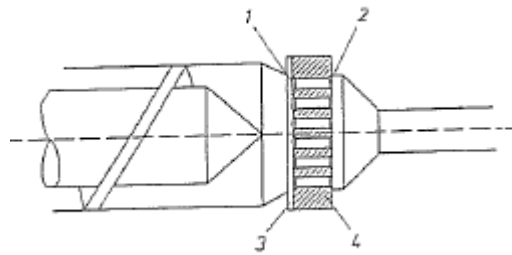


Fig. 5.10 Example of a breaker plate assembly. 1 Inlet, 2 Outlet, 3 Screen pack, 4 Breaker plate

Figura 4-10: Plato rompedor [3]

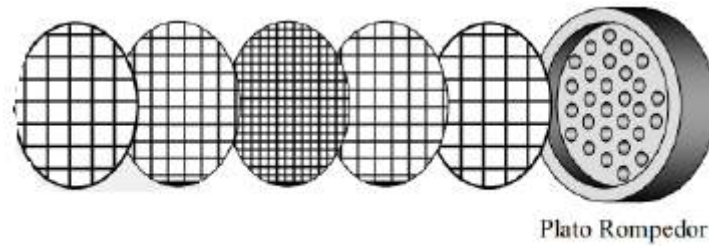


Figura 4-11: Plato rompedor y mallas [13].

Generalmente para usos de extrusión, el plato rompedor debe ser mayor que el diámetro del tornillo, del orden de 2,1 a 2,2 veces el diámetro del mismo.

Proponiendo un diámetro de tornillo de 30 mm, las dimensiones del plato rompedor son las siguientes:

Tabla 4-4: Dimensiones generales del plato rompedor.

Dimensiones generales plato rompedor		
Diámetro	0.063	m
Área plato	0.003117245311	m ²
Fuerza s/ plato	978733.3075	N
Tensión adm	800000000	Pa
Factor seg	0.7	-
Espesor	0.00883051269	m
	8.83051269	mm
Espesor adoptado	10	mm

Por su parte, se decide colocar una serie de mallas filtrantes de las siguientes características:

MALLA	DIAMETRO DE ALAMBRE (en mm)	LUZ DE MALLA (en mm)	AREA ABIERTA (%)
Mallas de acero inoxidable lisas			
18	0.4	1.01	51.34
	0.5	0.91	41.69
25	0.16	0.86	70.98
	0.3	0.72	49.66
	0.35	0.67	42.97
100	0.1	0.154	36.76

Figura 4-12: Mallas elegidas. Fuente: <https://www.sueirotelametalica.com.ar>

Se define utilizar 4 mallas filtrantes, siendo la más pequeña una malla de filtrado de 100 micrones.

De esta manera, sumando las caídas de presión de cada uno de los elementos que componen este sector, se obtiene la caída de presión máxima en la zona:

Tabla 4-5: Caída de presión en la zona de mallas.

Total Delta P	1.496207148	Mpa
----------------------	--------------------	------------

De esta manera se diseña el plato rompedor utilizando 17 agujeros con diámetros de 5 mm, utilizando una viscosidad de 400 Pa.s (polímero proveniente del tornillo) y utilizando una velocidad de cizalla constante de 100 s⁻¹.

Tabla 4-6: Caída de presión en el plato rompedor.

Plato rompedor		
n	17	Cant ag
Radio conducto	0.015	
d agujeros	0.005625	Diam ag
b	0.01	Espesor
K	000000041771390	m3
Velocidad cizalla	100	s-1
Viscosidad	400	Pa. s
Delta P	51817.81461	Pa
	0.05181781461	MPa

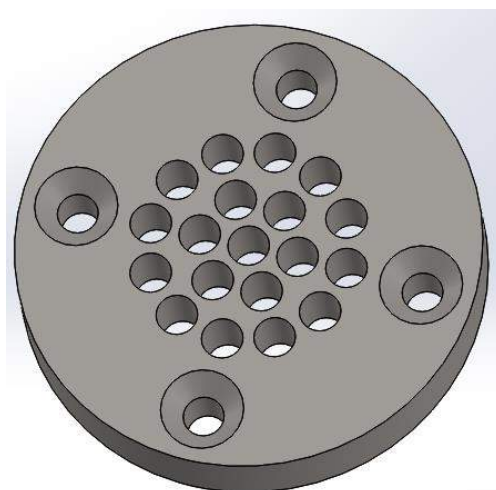


Figura 4-13: Plato rompedor.

Para la sujeción del plato rompedor, se realizan 4 agujeros para la colocación de tornillos M5. Para el caso de las mallas filtrantes, las mismas simplemente se colocan sobre el plato rompedor y dentro del alojamiento del tramo de entrada a la mezcla.

4.2.1.2 Tramo entrada de la mezcla

El tramo de entrada de la mezcla está compuesto por 3 canales que convergen el flujo de fundido hacia la zona anular del cabezal. Estos 3 canales son cilíndricos y cónicos completos, es decir, no poseen canales anulares. Por lo tanto, las fórmulas utilizadas en el [Anexo A: Memoria de cálculo](#) serán diferentes a los demás canales, tal como se puede observar en el marco teórico.

Como se puede observar en los cálculos realizados en la memoria de cálculo, se utiliza un diámetro mayor de 30 mm, un diámetro menor de 8 mm y un largo total de 140 mm sumando los 3 canales.

Tabla 4-7: Caídas de presión.

Radio mayor	
r	0.015 m
L	0.03 m
K	0.0000006626797 m ³
Velocidad cizalla	2.041429445 s ⁻¹
Viscosidad	800 pa.s
Delta P	6532.574223 Pa
	0.006532574223 Mpa
Tau [MPa]	0.001633143556 Mpa

Cono	
r0	0.004 m
R0	0.015 m
L	0.04 m
K	0.0000000211352 m ³
Velocidad cizalla	18.524621 s ⁻¹
Viscosidad	800 pa.s
Delta P	204823.421 Pa
	0.204823421 MPa
Tau [MPa]	0.03840439143 Mpa

Tramo largo	
r	0.004 m
L	0.07 m
K	0.0000000014361 m ³
Velocidad cizalla	107.6535059 s ⁻¹
Viscosidad	700 pa.s
Delta P	2637510.894 Pa
	2.637510894 Mpa
Tau [MPa]	0.07535745412 Mpa

Para realizar la unión entre el tramo de entrada de la mezcla y el cilindro de la extrusora, se propone una unión mediante bridas abulonadas, como es generalmente encontrado en las máquinas de extrusión.

El cálculo correspondiente para los bulones se puede encontrar en el Anexo: Memoria de cálculo.

Se puede observar que los diámetros propuestos generan velocidades de corte y esfuerzos de cizalla dentro de los rangos permitidos establecidos anteriormente.

4.2.1.3 Tramo anular recto

Este tramo tiene la característica de denominarse “tramo de relajación de la mezcla”. Esto es así ya que el flujo, proveniente del tramo de entrada y que se encuentra ingresando al housing, normaliza los esfuerzos que sufre al fluir por los canales llegando a un estado de “relajación”, donde su viscosidad y parámetros de flujo se normalizan, impidiendo además que se formen defectos de extrusión tanto superficiales (dependientes del esfuerzo de corte generado en los canales) y volumétricos (dependientes de la homogeneidad y tiempos de residencia del flujo). Este canal debe ser por lo menos del mismo largo del diámetro medio por donde se encuentra fluyendo, dependiendo del tipo de polímero o mezcla que se encuentre utilizando (agregar referencia a libro “Extrusion dies for plastics and rubber”)

El canal anular en cuestión está formado por el housing y el mandril, por donde el flujo comienza a fluir “relajándose” hasta el tramo anular cónico y luego, la boquilla de extrusión.

Para este caso, se proponen los siguientes valores:

Tabla 4-8: Caída de presión en la zona anular.

Zona anular 1		
r0	0.03	m
R0	0.04	m
H	0.01	m
L	0.07	m
K	0.0000003111040	m ³
Velocidad cizalla	1.291842071	s ⁻¹
Viscosidad	800	pa.s
Delta P	13914.97204	Pa
	0.01391497204	Mpa
Tau [MPa]	0.0009939265746	Mpa

A partir de los radios y longitud del canal, se puede obtener la velocidad de cizalla aparente en el canal, y a partir de la viscosidad (obtenida a partir de la gráfica de viscosidades en función de velocidades de cizalla expresada en el Marco Teórico), se puede calcular la caída de presión y esfuerzo de cizalla.

Se observa que con una longitud de 70 mm, y canal de 1 cm con diámetro mayor de 80 mm, el esfuerzo de corte se encuentra dentro del rango permitido.

Se debe destacar que, como se menciona en el marco teórico, la caída de presión es inevitable dentro de los conductos del cabezal, y se busca disminuir la misma para poder obtener la presión de extrusión necesaria, pero al mismo tiempo obtener el valor de caída de presión necesaria para poder generar el caudal de extrusión que garantice la producción deseada.

Como anteriormente se expresó, el caudal deseado máximo es de 15 Kg/h, y a partir del mismo se calcula el flujo volumétrico (dividiendo el mismo por la densidad del polímero fundido) el cual se utiliza para los cálculos pertinentes de velocidad de cizalla, caída de presión y esfuerzo de cizalla.

4.2.1.4 Tramo anular cónico

Este tramo es utilizado como convergencia del flujo hacia el alma del electrodo, la cual se encuentra con un movimiento a velocidad constante (0,05 m/s). El fluido proveniente de la zona de relajación converge hacia la zona de encuentro con el alma del electrodo, provocando la unión del mismo mediante la presión existente en el sector.

Tal como se mencionó anteriormente, cada tramo tiene una caída de presión y debe procurarse no generar una caída de presión que provoque una caída de presión de operación menor a 10 Mpa.

Las dimensiones del tramo en cuestión resultan las siguientes:

Tabla 4-9: Caída de presión en la zona anular.

Sección anular cónica		
Ro	0.035	m
R1	0.006	m
d1	0.01	m
d2	0.01	m
m	17616.08626	
L	0.05	m
k	0.000000172392031	m ³
Velocidad cizalla	2.344220733	s ⁻¹
Viscosidad	800	pa.s
Delta P	25111.39459	Pa
	0.02511139459	Mpa
Tau [Mpa]	0.001875376586	Mpa

De esta forma, el canal proveniente del canal cónico (zona de relajación) mantiene sus dimensiones hasta converger en la zona de encuentro antes del dado de extrusión.

Como se puede deducir, dentro de las 2 opciones de cabezales de extrusión para recubrimientos, se opta por utilizar el método de recubrimiento por presión, en donde el fluido fundido se encuentra con el alambre previo al ingreso a la boquilla de extrusión, generando altas presiones. Este método es utilizado en recubrimiento de cables o donde se necesite un buen contacto entre el polímero y el alambre.

4.2.1.5 Tramo boquilla de extrusión

La boquilla de extrusión, según las referencias bibliográficas investigadas, debe poseer de 4 a 5 veces el diámetro de extrusión, para polímeros como PE y PP. Esto se realiza como una nueva “relajación” del polímero sobre el alambre, para poder normalizar sus esfuerzos y otorgar una salida uniforme, asegurando una colocación homogénea sobre el alma del electrodo.

A partir de las condiciones de contorno del proyecto, expresadas en el capítulo 1, se tiene el diámetro interior (alma del electrodo de diámetro exterior 5 mm) y exterior (electrodo de máximo 10 mm de diámetro) del canal anular analizado para este sector.

Los valores característicos para el tramo son:

Tabla 4-10: Caída de presión en la boquilla.

Zona boquilla		
r0	0.005	m
R0	0.01	m
H	0.005	m
L	0.05	m
K	.0000000141316360	m3
Velocidad cizalla	20.66947313	s-1
Viscosidad	700	pa.s
Delta P	268042.4809	Pa
	0.2680424809	Mpa
Tau [MPa]	0.01340212405	Mpa

Y cómo es posible observar, el valor de esfuerzo de cizalla se encuentra dentro de los límites permitidos.

4.2.2 Cálculo de factor conductividad del cabezal

Para el cálculo del caudal de extrusión, tanto el que pasa por el cabezal como el que surge del tornillo extrusor, es necesario conocer el factor de conductividad total K del cabezal. El mismo, depende de las secciones y longitudes de los canales de extrusión y se sabe, a partir de la fórmula de flujo volumétrico, que a mayor factor K, mayor será el caudal extruido. Por lo tanto, se interpreta como un factor que indica la cantidad permisiva de flujo que es posible transitar por el cabezal, y que afectará directamente en el caudal volumétrico extruido.

Teniendo en cuenta todos los tramos y secciones pertenecientes a los tramos, se puede obtener el factor de conductividad del cabezal.

Para observar las fórmulas correspondientes a los cálculos, se debe dirigir a Anexo: Memoria de cálculo

Tabla 4-11: Sumatoria de las conductividades.

VALORES DE K [m3]		1/K	
K FILTRO	0.00000004177139041	23939830.35	[1/m3]
K1	0.0000006626797004	1509024.646	[1/m3]
K2	0.00000002113529941	47314210.24	[1/m3]
K3	0.000000001436156642	696302876	[1/m3]
K4	0.0000003111040622	3214358.542	[1/m3]
K5	0.0000001723920315	5800732.151	[1/m3]
K6	0.00000001413163606	70763214.96	[1/m3]
KTOTAL		0.000000001178072425	[m3]

4.2.3 Cálculo de caudal de extrusión

Una vez calculado el factor de conductividad del cabezal K, es posible calcular el caudal producido tanto por el tornillo de extrusión como el que fluye por el cabezal de extrusión.

Tal como se puede deducir, ambos caudales deben ser lo más aproximados posibles, lo cual significa que el caudal generado en desde el tornillo es prácticamente el mismo que sale por el cabezal. Es común que haya una pequeña variación entre los mismos debido a cambios de parámetros como viscosidad, velocidad de cizalla y esfuerzo de corte, ocasionando que una parte del flujo “no llegue” a transitar todo el cabezal.

Partiendo del dato del caudal teórico, calculado como la producción deseada sobre la densidad del polímero fundido, se calculan los caudales con sus correspondientes fórmulas para luego realizar una comparación entre los mismos:

- **Caudal producido desde el tornillo extrusor [4]:**

$$Q = \frac{\alpha K}{K + \beta + \gamma} \quad (4.17)$$

Como se observa en la fórmula, el caudal producido desde el tornillo es directamente proporcional al flujo de arrastre α , el factor de conductividad del cabezal y las RPM del tornillo, e inversamente proporcional a los flujos de retroceso y presión generados en el cilindro del tornillo. El cálculo queda:

Tabla 4-12: Comparación de caudales.

Caudal teórico de prod	0.000005411255411	m3/s
Q calculado desde el tornillo (Q1)	0.0003245429821	[m3/min]
	0.000005409049702	[m3/seg]

- **Caudal dentro del cabezal:**

$$\dot{V} = \frac{K}{\eta} \Delta p \quad (4.18)$$

Como se observa en la ecuación, el caudal volumétrico es directamente proporcional al factor de conductividad K y la caída de presión dentro del cabezal, e inversamente proporcional a la viscosidad en el mismo.

Por lo tanto, se calcula la caída de presión dentro del cabezal sumando todas las caídas de presión, desde las mallas filtrantes hasta la boquilla de salida obteniendo:

Tabla 4-13: Caída de presión total

CAIDA DE PRESION TOTAL	3207753.551	Pa
	3.207753551	Mpa

Y entonces, el caudal volumétrico del cabezal, utilizando una viscosidad promedio de 700 Pa.s dentro del cabezal, queda:

Tabla 4-14: Caudal volumétrico

Caudal teórico de prod	0.000005411255411	m3/s
Q calculado 2	0.000005398522862	[m3/seg]

Ahora, realizando una comparación entre los caudales obtenidos:

Tabla 4-15: Comparación entre caudales.

Diferencia entre Q1 y Q2	0.1949948103	%
	194994.8103	[cm3/seg]
Diferencia entre Qteorico y Q1	0.04076151482	%
	40761.51482	[cm3/seg]
Diferencia entre Qteorico y Q2	0.2352975071	%
	235297.5071	[cm3/seg]

La diferencia entre el caudal teórico y el caudal producido desde el tornillo posee una diferencia de 0,04%, lo cual es insignificante y representa la correcta elección de los parámetros del tornillo para la extrusión.

La diferencia entre el caudal teórico y el caudal que fluye por el cabezal debido al factor K y la caída de presión es de un 0,23%, lo cual también se encuentra dentro de los límites permitidos establecidos por los ingenieros. Una diferencia del 0,23% implica que solo una muy pequeña parte del caudal que fluye por el cabezal (alrededor del orden de décimas de m3/seg) no será entregada en la salida.

Como criterio, puede tomarse un máximo de 5% de diferencia entre los caudales calculados y el teórico para notar cambios significativos en el caudal extruido.

Como anteriormente se mencionó, esta diferencia puede darse por cambios en los parámetros como viscosidad y velocidad de cizalla. Por lo tanto, durante el diseño del cabezal se tendrá en cuenta la posibilidad de regular la caída de presión para poder ajustar el caudal de salida en un rango determinado.

Por su parte, como se puede observar, la caída de presión máxima generada para los canales dimensionados en el cabezal es de 3,2 Mpa, con lo cual se asegura que la caída de presión en el cabezal es la adecuada para mantener una presión de extrusión

adecuada (alrededor de 12 Mpa) y además un caudal de extrusión dentro del rango permitido (produciendo un caudal con 0,23% menos que el caudal teórico).

Esta diferencia encontrada de 0,23% podrá corregirse a partir de un mecanismo de regulación de la caída de presión dentro del cabezal.

4.2.4 Cálculo del espesor del housing

Prosiguiendo con el proceso de diseño, el próximo paso para poder comenzar a definir los componentes que se encontrarán en el cabezal, se procede a calcular el espesor del housing, el cual contiene a los demás componentes de extrusión.

Para ello, y siguiendo la metodología expresada en Diseño en ingeniería mecánica - Shigley, *“en los recipientes cilíndricos presurizados, cilindros hidráulicos, cañones de pistolas y tubos de conducción de fluidos a altas presiones se desarrollan esfuerzos radiales y tangenciales con magnitudes que dependen del radio del elemento bajo consideración. Al determinar el esfuerzo radial σ_r y el esfuerzo tangencial σ_t , se supone que la elongación longitudinal es constante alrededor de la circunferencia del cilindro”*

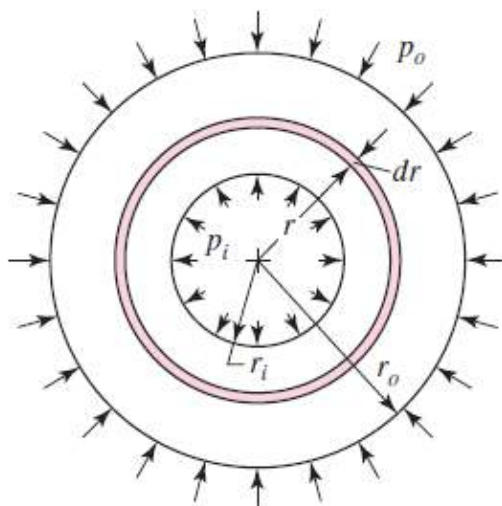


Figura 4-14: Esfuerzos en una pieza cilíndrica [8].

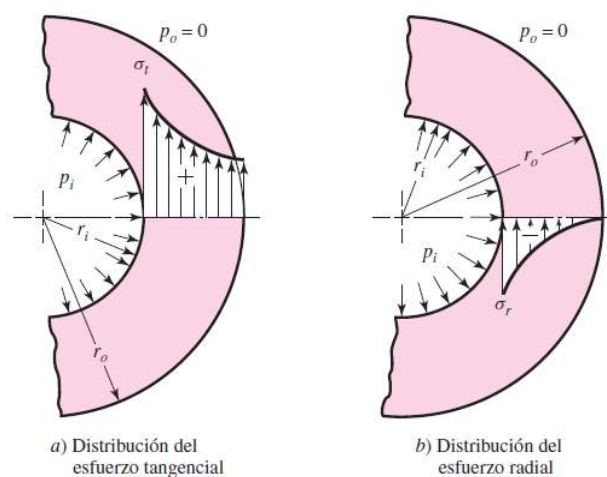


Figura 4-15: Esfuerzos en una pieza cilíndrica [8].

En la anterior imagen se puede observar la representación esquemática de un cilindro con radio interior r_i , radio exterior r_o , presión p_i y su correspondiente distribución de esfuerzos tangenciales (máximos y positivos en el interior del recipiente) y esfuerzos radiales (máximos y negativos en el interior del recipiente).

En el caso de que la presión externa p_o sea nula, las fórmulas para el cálculo de las tensiones presentes en el cilindro son las siguientes:

$$\begin{aligned}\sigma_t &= \frac{r_i^2 p_i}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_o^2}{r^2} \right) \\ \sigma_r &= \frac{r_i^2 p_i}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_o^2}{r^2} \right)\end{aligned}\quad (4.19)$$

Además, deben considerarse los esfuerzos longitudinales cuando el propio recipiente a presión toma las reacciones en los extremos debidas a la presión interna.

$$\sigma_l = \frac{p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad (4.20)$$

Estableciendo los radios y utilizando la presión máxima de diseño de 300 Mpa, se pueden calcular los esfuerzos dentro del housing. Luego, estableciendo un límite superior de tensión admisible (tensión admisible por un factor de seguridad), se puede corroborar a partir de la teoría de la energía de distorsión de Von Misses que los esfuerzos generados se encuentran dentro del límite permitido. Para observar los cálculos puede dirigirse al Anexo: Memoria de cálculo.

Tabla 4-16: Espesor del cabezal.

ESPESOR DEL CABEZAL		
ri	40	mm
e propuesto	30	mm
ro	70	mm
Pi	313.9737845	Mpa
ESFUERZO TANGENCIAL MAXIMO (r=ri)	618.433212	Mpa
ESFUERZO RADIAL MAXIMO (r=ri)	-313.9737845	Mpa
ESFUERZO LONGITUDINAL	152.2297137	Mpa
primer termino	869382.8071	
segundo termino	217345.7018	
tercer termino	217345.7018	
SIGMA VON MISSES	807.4881456	Mpa
Sigma fluencia Acero AISI 420 - 1.2083	1300	Mpa
Limite superior	910	Mpa

Se observa que con un espesor de 30 mm, ya se cumple la condición de que las tensiones sean menores que el límite superior establecido para el acero 1.2083.

Este espesor puede también trasladarse a los demás componentes del cabezal que se encuentren bajo la presión máxima de diseño, como el tramo de entrada de la mezcla al cabezal.

Para corroborar que los cálculos se encuentran en condiciones, se procederá una vez mostrado el diseño de los componentes a mostrar los resultados de las simulaciones realizadas en SolidWorks donde se somete al componente a la presión de diseño.

4.2.5 Diseño de los componentes del cabezal

Una vez definidos los datos de secciones de los canales, longitudes y espesores mínimos admisibles para los componentes del cabezal, se procede a mostrar el diseño de los mismos.

Los materiales con los que se encuentran fabricados los componentes del cabezal son de acero 1.2083 definido anteriormente.

4.2.5.1 Tramo entrada de la mezcla

El diseño del tramo de entrada de la mezcla, el cual conecta el cilindro de extrusión donde se encuentra el tornillo de extrusión con el housing, se realiza de la siguiente manera, respetando las longitudes y diámetros definidos anteriormente:

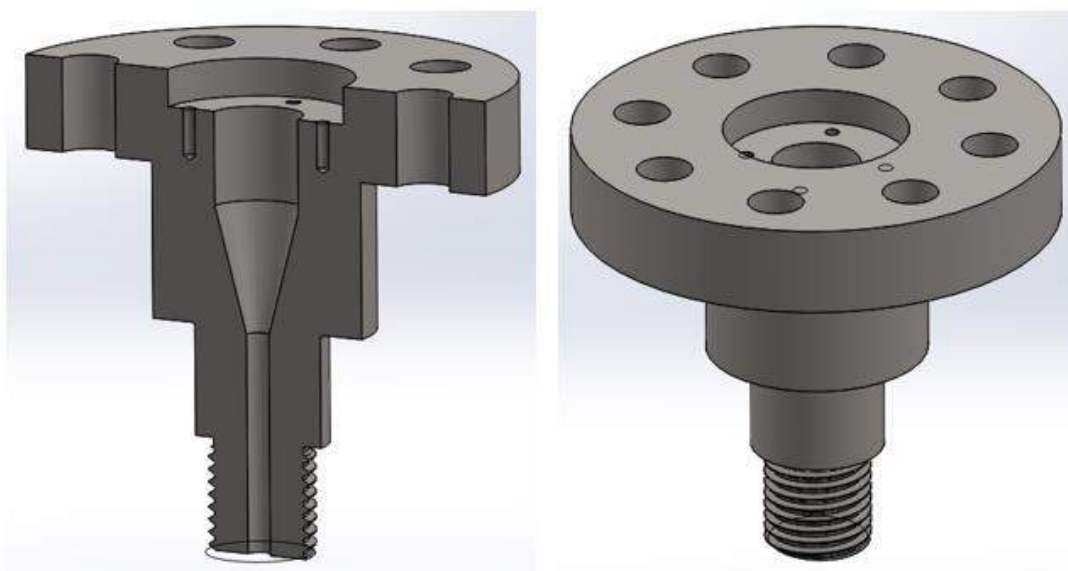


Figura 4-16: Diseño de la entrada.

La conexión del tramo con el cilindro de extrusión se realiza mediante una brida con bulones, como generalmente se realiza en máquinas extrusoras. El diámetro de los bulones es de 18 mm con una cantidad de 8 igualmente espaciados. El cálculo de los mismos puede encontrarse en el Anexo: Memoria de cálculo.

La conexión entre el tramo y el housing se propone mediante una rosca M36 x 4 mm.

Para el alojamiento de la placa rompedora y los filtros, se mecaniza un espacio y 4 agujeros roscados M5 para la sujeción de los mismos.

Para este caso, se simula la presión máxima en los canales internos del tramo, obteniendo que el espesor sea posible de disminuir. En este caso, se utiliza un diámetro externo mayor (donde se encuentra el tramo cónico) de 75 mm y un diámetro menor de 45 mm. Esto se realiza así por la razón de poder colocar las resistencias termoeléctricas de calentamiento del cabezal.

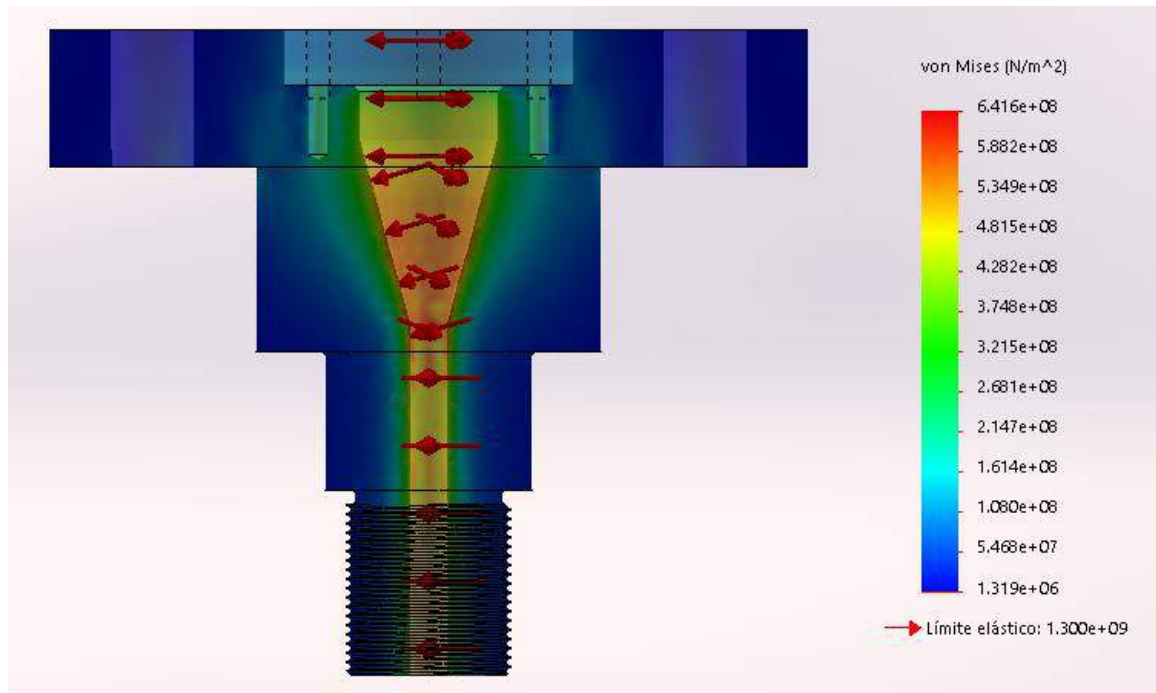


Figura 4-17: Simulación de la entrada.

Verificando estos espesores mediante simulaciones, se observa que las tensiones son menores que el límite elástico del material.

4.2.5.2 Housing

Para el diseño del housing, se realizó una iteración para poder obtener resultados de simulación correctos y, por lo tanto, un correcto diseño que respete las geometrías y soporte los esfuerzos máximos.

Teniendo como datos de entrada el diámetro interior del housing (80 mm), la longitud de la zona de relajación de la mezcla (tramo anular recto), el espesor mínimo requerido y la conexión roscada con el tramo de entrada de la mezcla, se dimensionó el housing teniendo en cuenta también las demás zonas de conexión de los componentes, como el mandril y la boquilla interior.

En un principio, al simular el diseño del housing con el tramo de entrada de la mezcla completamente roscado al mismo, se obtuvieron los siguientes resultados:

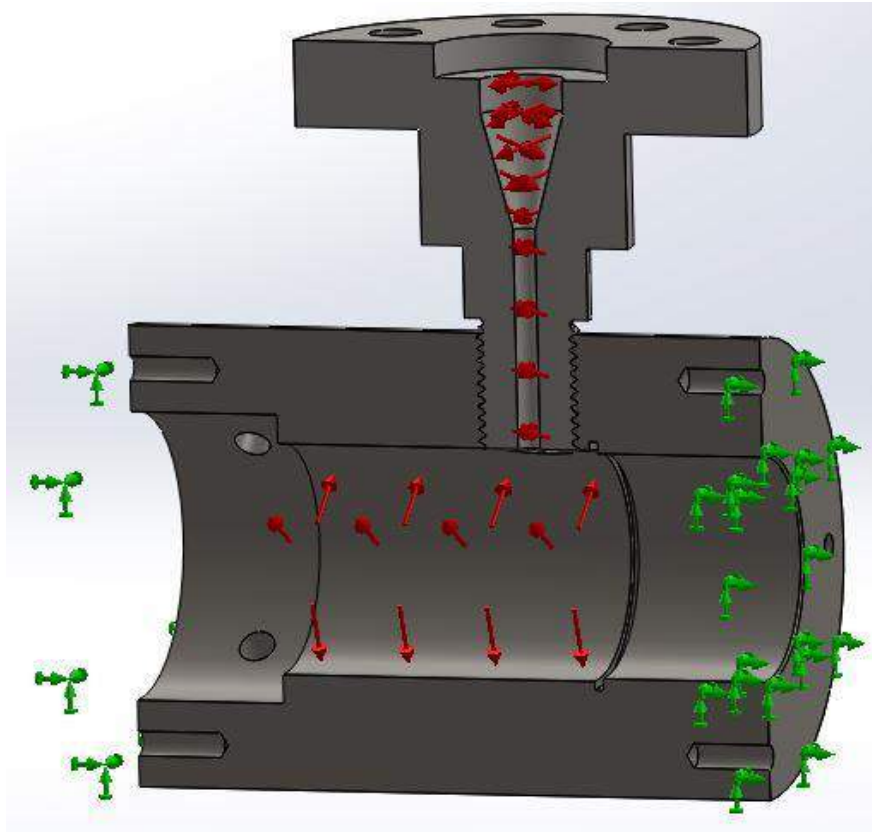


Figura 4-18: Simulación del cabezal.

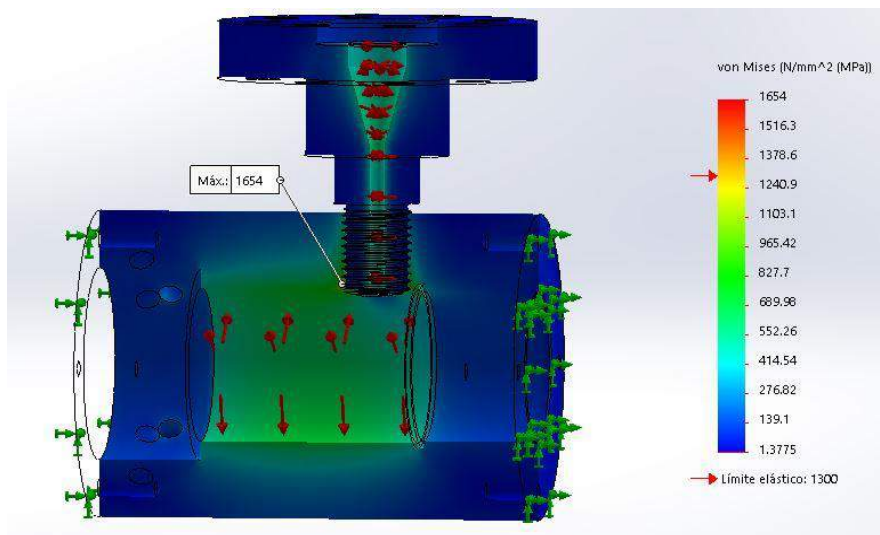


Figura 4-19: Simulación del cabezal.

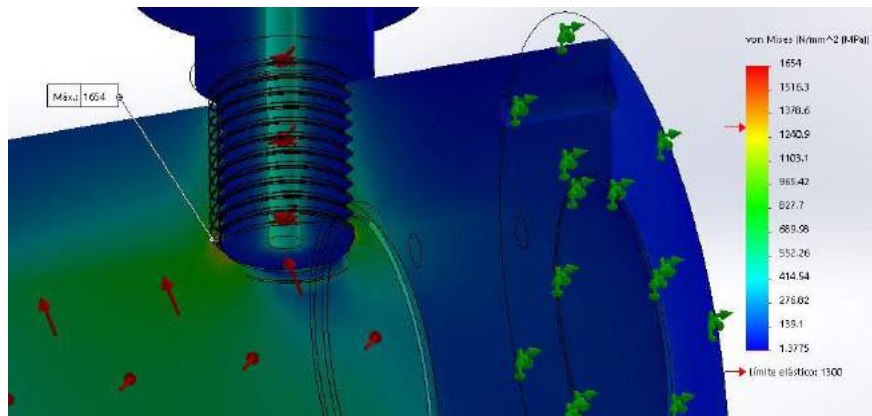


Figura 4-20: Simulación del cabezal.

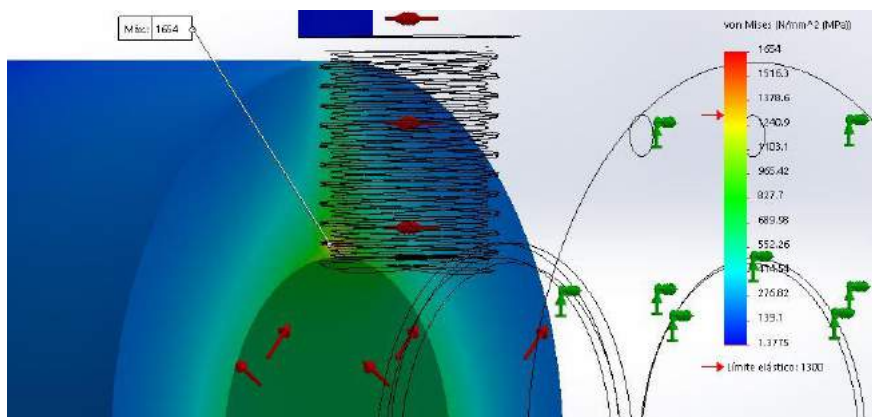


Figura 4-21: Simulación del cabezal.

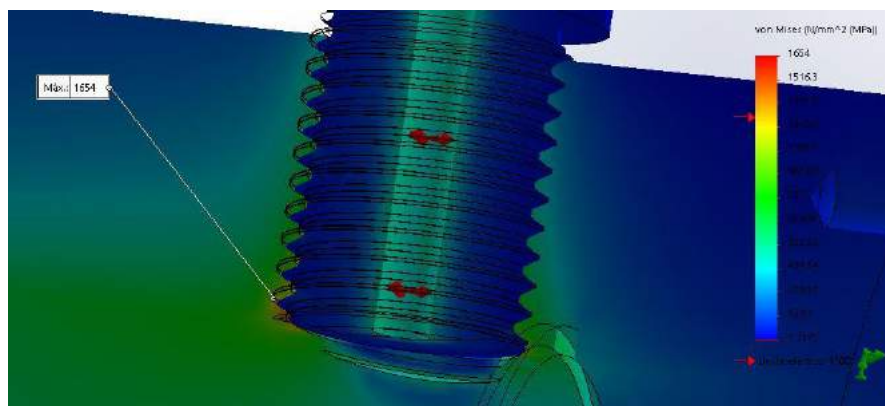


Figura 4-22: Simulación del cabezal.

Se observa que las tensiones generadas en una zona puntual de la rosca, en ese momento de dimensiones M30 x 2,5 mm, excedían el límite elástico del material. La tensión máxima encontrada fue de 1654 Mpa, mientras que el límite elástico del material es de 1300 Mpa.

Por su parte, las deformaciones fueron las siguientes:

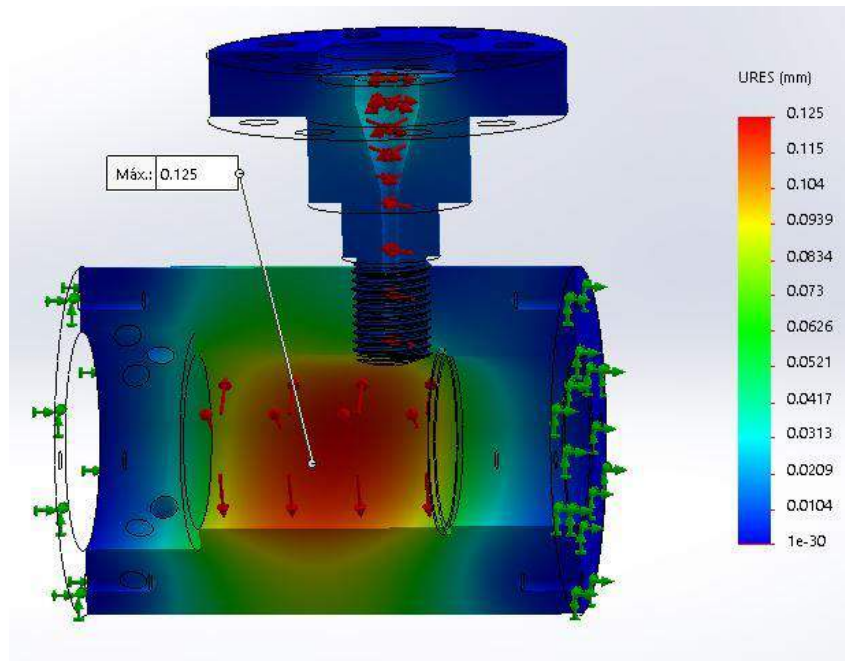


Figura 4-23: Simulación del cabezal.

Considerando que una deformación de 0,125 mm se encuentra dentro de los rangos “normales” de deformación para una presión excesiva de 300 Mpa, se admite que el resultado es esperado y no compromete al funcionamiento del cabezal de extrusión, en caso de que el mismo llegue a la presión máxima de estancamiento.

Para poder solucionar este inconveniente, se procedió a aumentar el tamaño de la rosca a M36 x 4 mm y disminuir la distancia de roscado. Además, se propone redondear aristas vivas para disminuir la concentración de tensiones que se generan durante el funcionamiento.

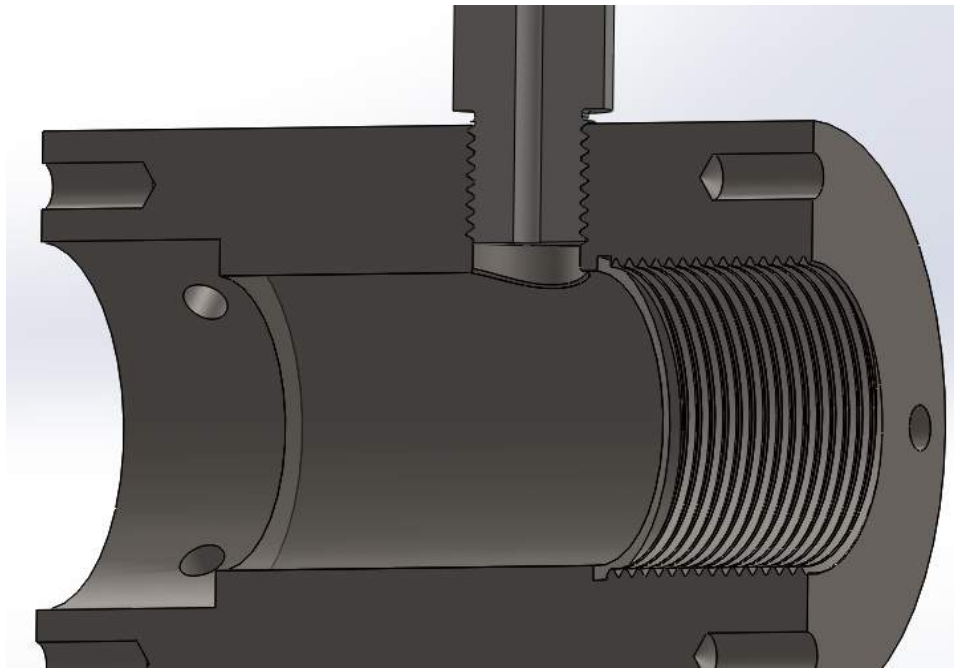


Figura 4-24: Diseño del housing.

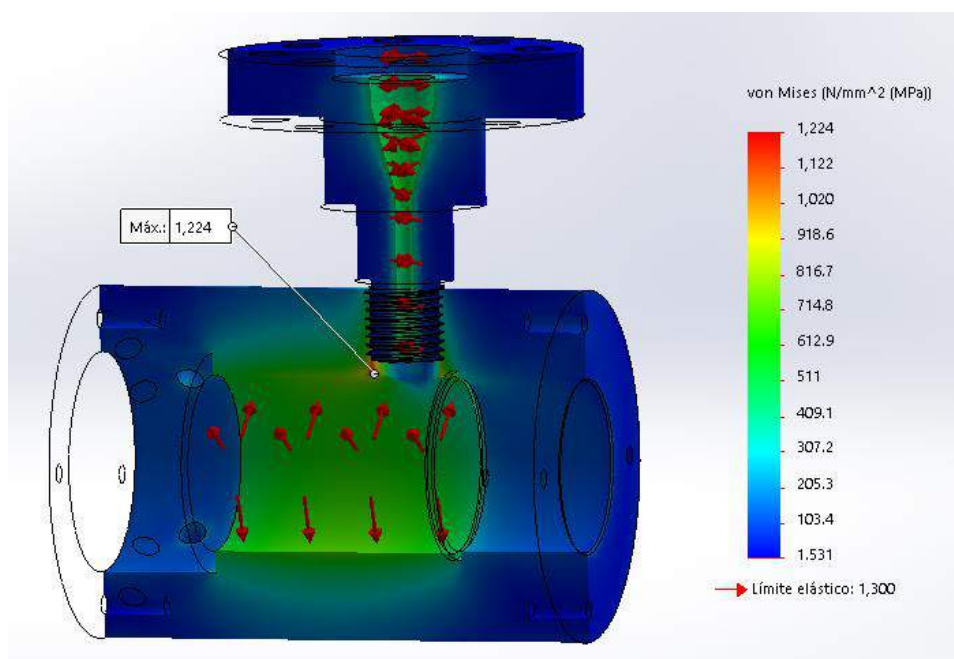


Figura 4-25: Simulación del cabezal.

Y por parte de los desplazamientos:

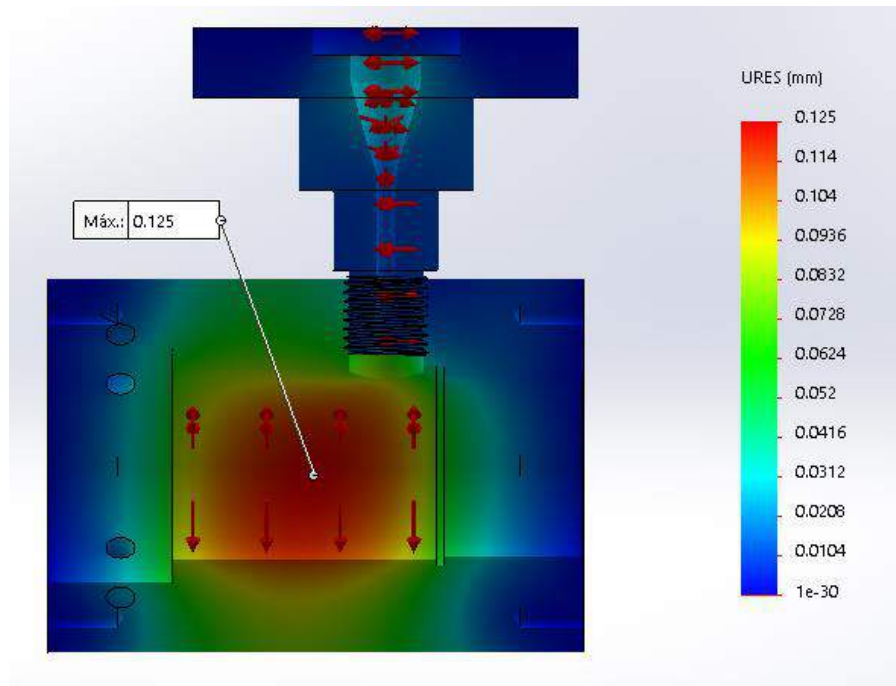


Figura 4-26: Simulación del cabezal.

De esta manera, la concentración de tensiones que presenta la rosca en la zona de salida resulta menor al límite elástico del material.

Es posible indicar también que esta zona podría ser, en caso de utilización con altas presiones por tiempos prolongados, una zona posible a resultar en una falla debido a las altas tensiones generadas.

Luego, al simular el housing de forma aislada:

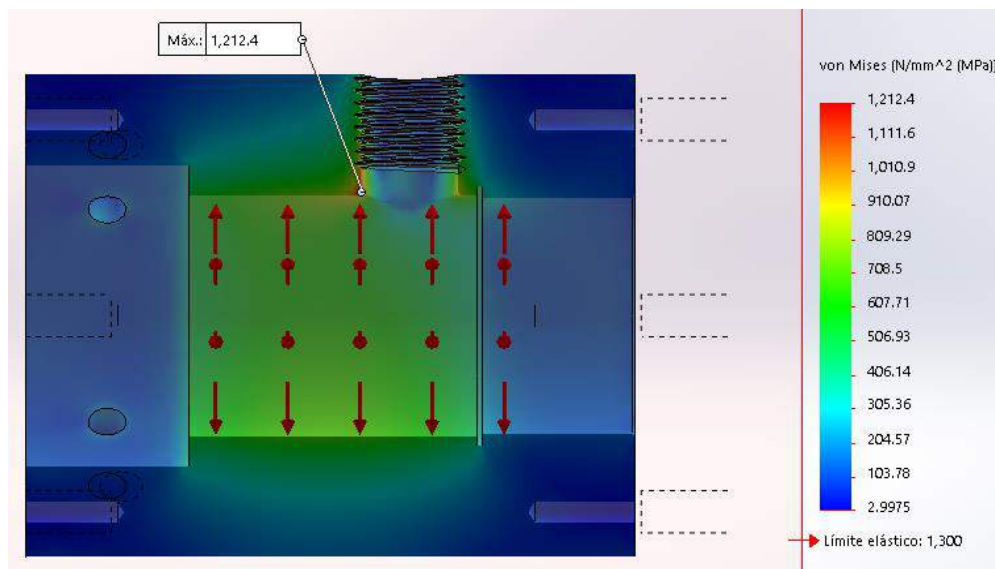


Figura 4-27: Simulación del cabezal.

Se observa que los resultados son adecuados para su utilización.

Continuando con el diseño del housing, posee la siguiente configuración:

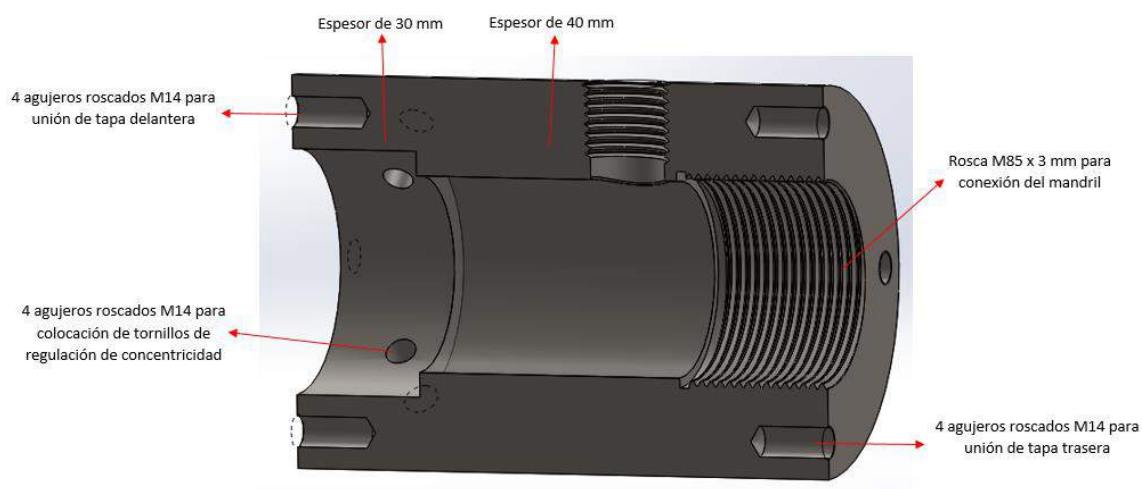


Figura 4-28: Diseño del housing.

Los espesores utilizados son los adecuados según los cálculos realizados, y también se verifica a partir de las anteriores simulaciones donde se puede observar que las tensiones máximas son generadas en la zona de finalización de la rosca M36 x 4 mm, pero siendo inferior al límite permitido, por lo que puede decirse que el housing se encuentra en buenas condiciones en cuanto a cargas y esfuerzos.

4.2.5.3 Boquilla interior

La boquilla interior se encuentra colocada dentro del housing y centrada por 4 tornillos M14 roscados a este último. De esta manera, es posible regular la concentricidad de extrusión, teniendo en cuenta que los procesos de fabricación no son exactos.

En los sistemas de cabezales de extrusión generales, centrar la boquilla de extrusión es realizado de esta manera, tal como se puede observar en la teoría.

El cálculo para el dimensionamiento de los tornillos M14 se podrán encontrar en el Anexo: Memoria de cálculo.

Este cálculo de dimensionamiento no sólo es útil para los tornillos de regulación de concentricidad, sino que también son utilizados para los tornillos que se colocan en las tapas delanteras y traseras (siguiendo el mismo criterio)

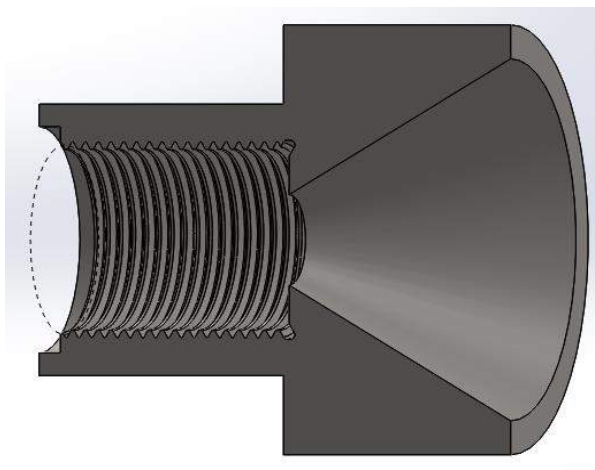


Figura 4-29: Boquilla interior.

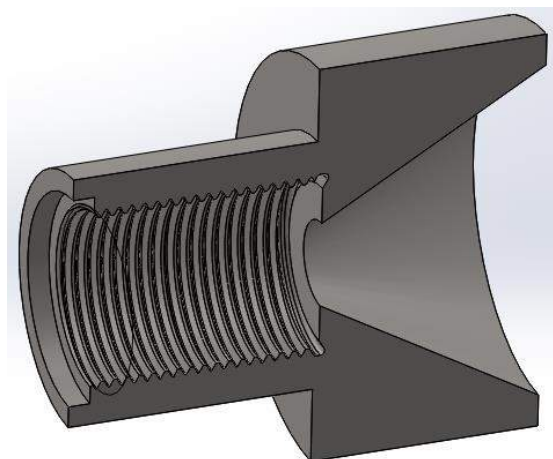


Figura 4-30: Boquilla interior.

Las tolerancias de fabricación de este componente son muy importantes para asegurar el correcto flujo del polímero de extrusión dentro de los canales. Las mismas se pueden ver en el Anexo: Planos de fabricación.

Por su parte, en la salida del componente se coloca la boquilla de extrusión. Esta última se coloca roscada, permitiendo intercambiar la misma en caso de querer utilizar otro diámetro de extrusión para el electrodo.

Como en los casos anteriores, se vuelve a simular el ensamblaje del cabezal añadiendo en este caso, la presión máxima de diseño dentro del componente y estando éste soportado por los 4 tornillos M14 con la relación de tornillo correspondiente.

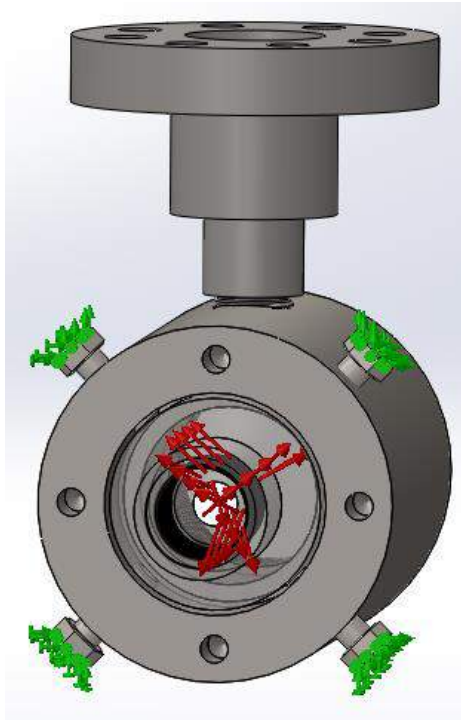


Figura 4-31: Simulación del cabezal.

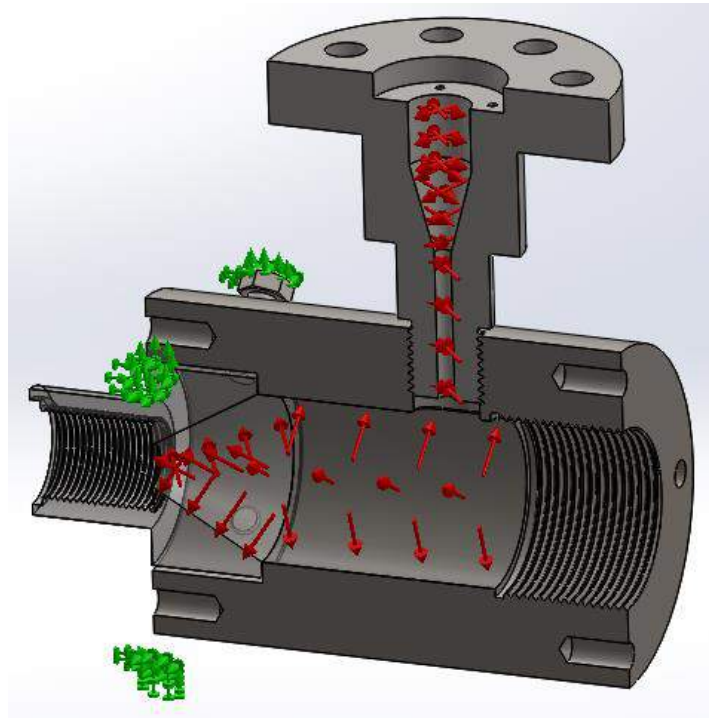


Figura 4-32: Simulación del cabezal.

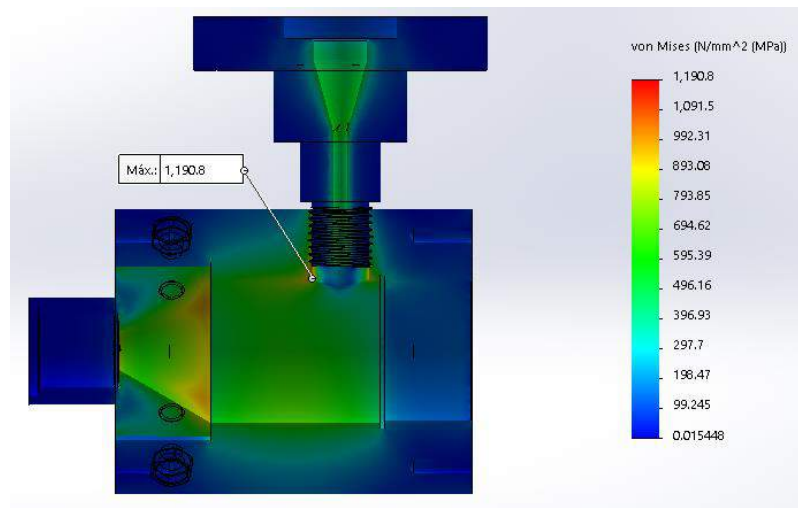


Figura 4-33: Simulación del cabezal.

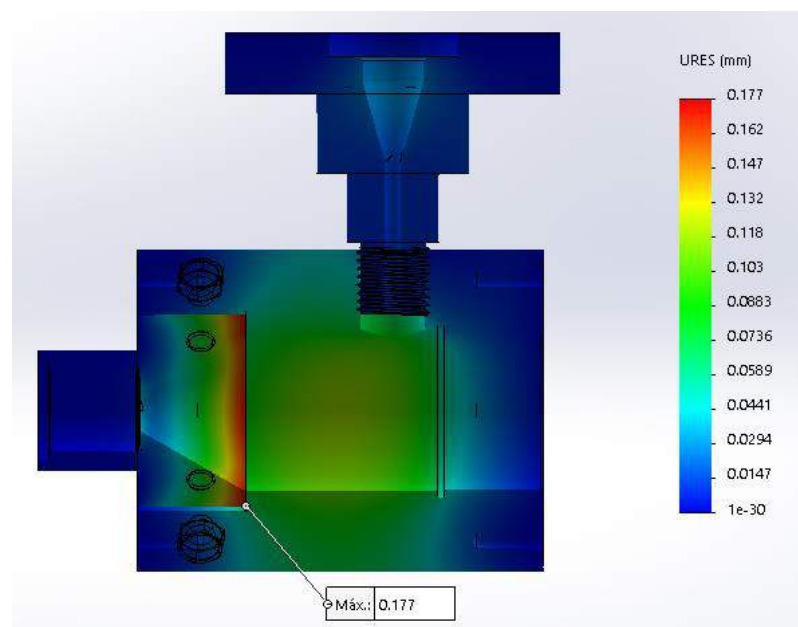


Figura 4-34: Simulación del cabezal.

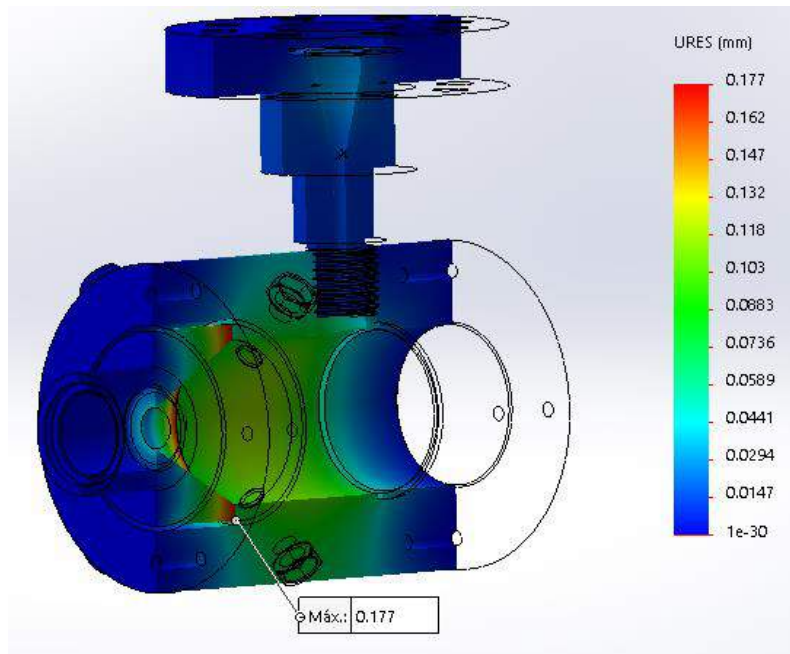


Figura 4-35: Simulación del cabezal.

Como se observa, las tensiones generadas son menores al límite elástico.

Por su parte, la deformación máxima es de 0,17 mm en la zona de inicio de componente, debido a que esta zona no se encuentra sujeta directamente por los tornillos. Se puede ver que los en la zona donde se encuentra soportado por los tornillos, no existe una deformación mayor. Se considera que el componente se encuentra en buenas condiciones de operación, debido a que al llegar a la presión máxima, la deformación generada no implica condiciones de riesgo para el funcionamiento del cabezal.

4.2.5.4 Boquilla de extrusión

La boquilla de extrusión, como anteriormente se mencionó, se coloca rosca en la boquilla interior. El diámetro interior de la boquilla en este caso es de 10 mm, y el largo de 50 mm (4 a 5 veces el diámetro de extrusión) permite que el polímero que se encuentra en contacto con el alma del electrodo se “relaje” normalizando los esfuerzos y obteniendo una extrusión homogénea y uniforme.

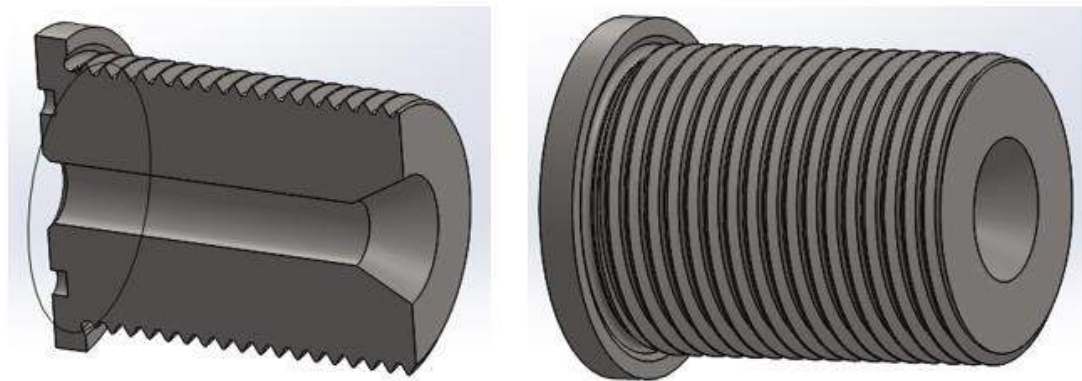


Figura 4-36: Diseño de la boquilla.

Es importante destacar que, en caso de querer colocar una boquilla de extrusión con un canal de extrusión diferente, se debe mantener el ángulo del cono de entrada debido a que es la conexión con el cono de la boquilla interior. De esta forma solo es necesario agrandar o disminuir el canal de extrusión, y se mantiene la conexión con la boquilla de entrada.

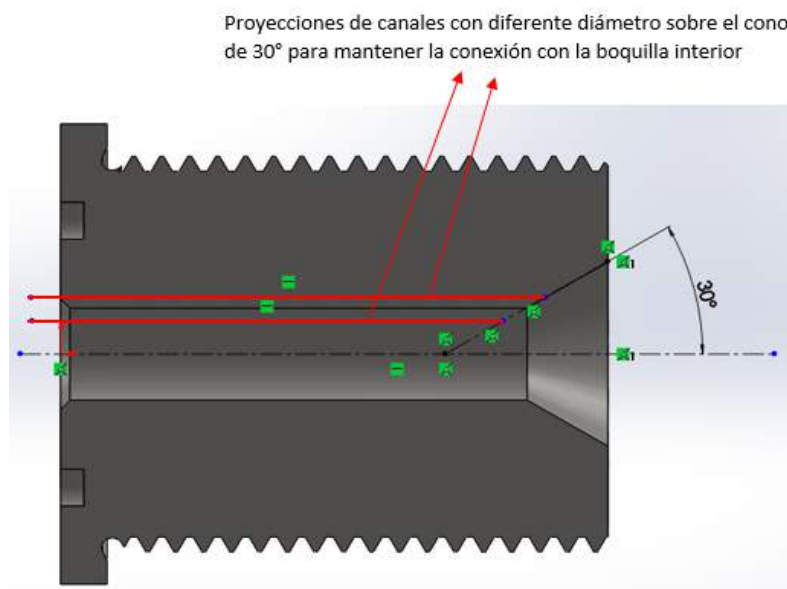


Figura 4-37: Diseño de la boquilla.

Al igual que en los demás componentes interiores del cabezal, este posee tolerancias de fabricación finas, con caras rectificadas para lograr la tolerancia y apoyo entre componentes deseado. En el Anexo: Planos de fabricación se podrán observar las cotas correspondientes.

Al igual que en los casos anteriores, se vuelve a simular el conjunto armado con la presión máxima de diseño para obtener los siguientes resultados:

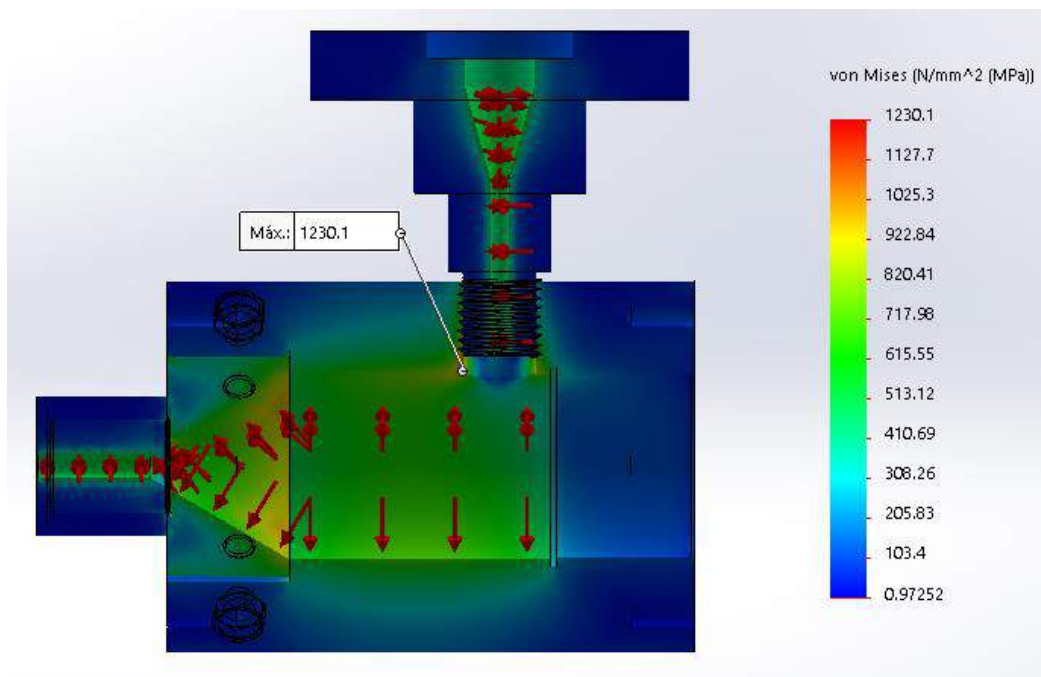


Figura 4-38: Simulación del cabezal.

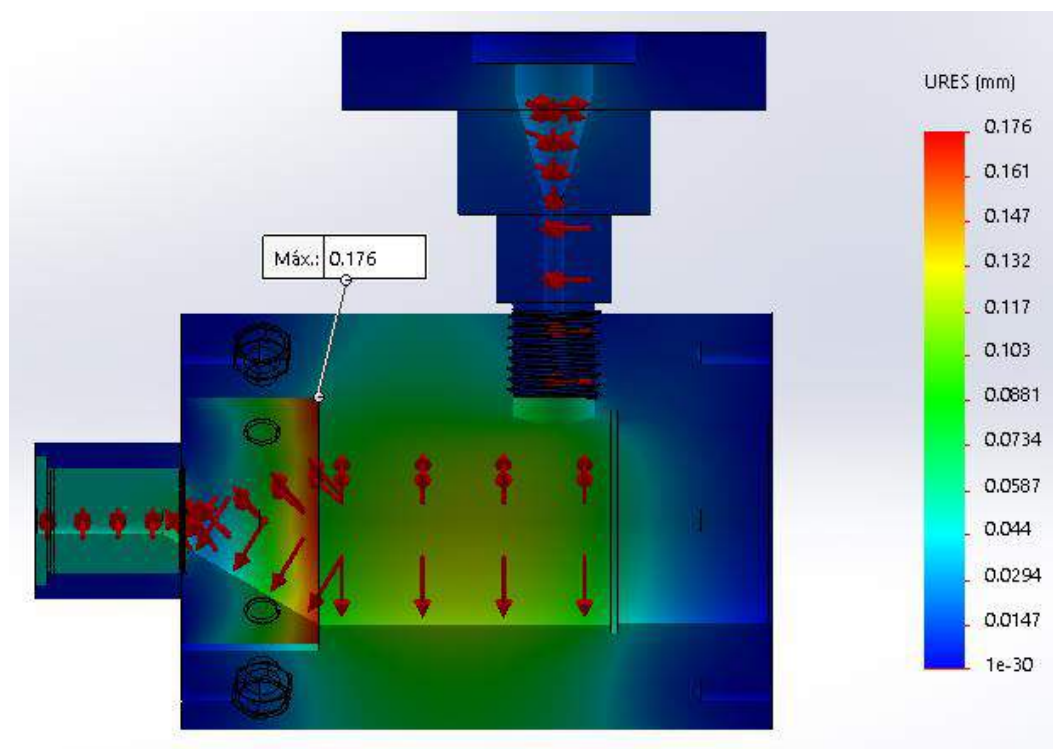


Figura 4-39: Simulación del cabezal.

Como se puede observar los resultados obtenidos indican que el ensamble se sigue encontrando en buenas condiciones.

4.2.5.5 Mandril

El mandril resulta uno de los componentes más importantes debido a que sobre el mismo se realiza el flujo de la mezcla de extrusión. Debe tener, como se puede encontrar en el Marco teórico, un canal que permita que el flujo de la mezcla que ingresa desde el tramo del cabezal se dirija hacia la salida del cabezal para su extrusión. Para esto, es propuesto un canal helicoidal para dirigir el flujo hacia la salida.

El diámetro del mandril debe ser tal que genere los canales de 1 cm propuestos para que la caída de presión, esfuerzos de cizalla y demás parámetros se mantengan según los cálculos.

A su vez, se propone que la unión entre el housing y el mandril sea mediante una rosca M85 x 3mm, asegurando el centrado del componente con respecto al mandril.

Para evitar el posible retroceso del flujo (como medida de seguridad, ya que se comprobará que el flujo se dirige hacia la salida con el diseño del cabezal propuesto), se coloca un sello O-ring de PTFE resistente a altas temperaturas entre el mandril y el housing.

A continuación, se muestra el diseño del mismo:

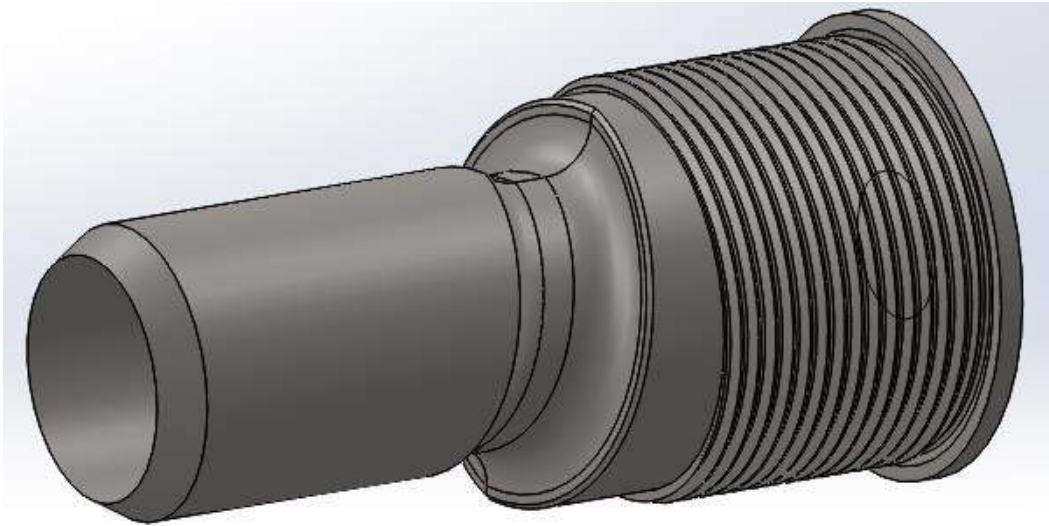


Figura 4-40: Diseño del mandril.

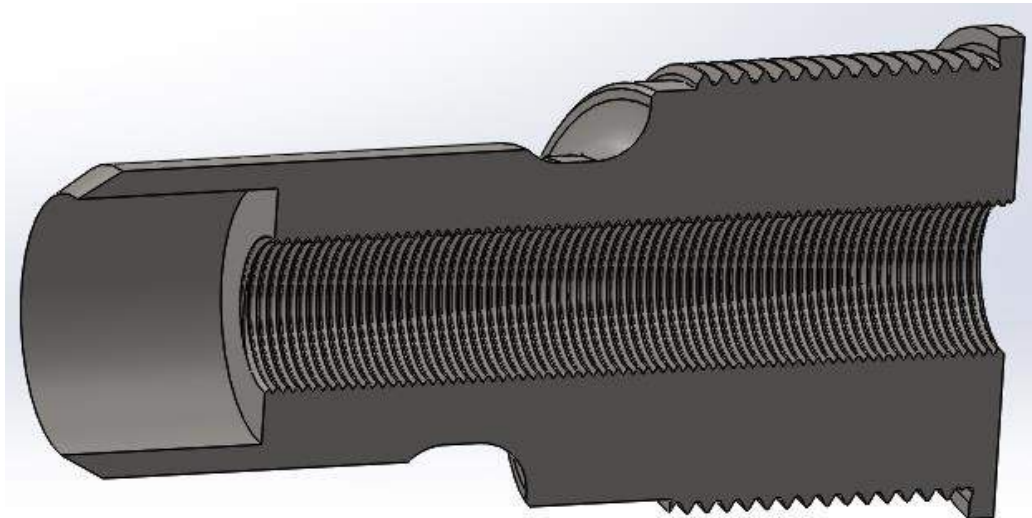


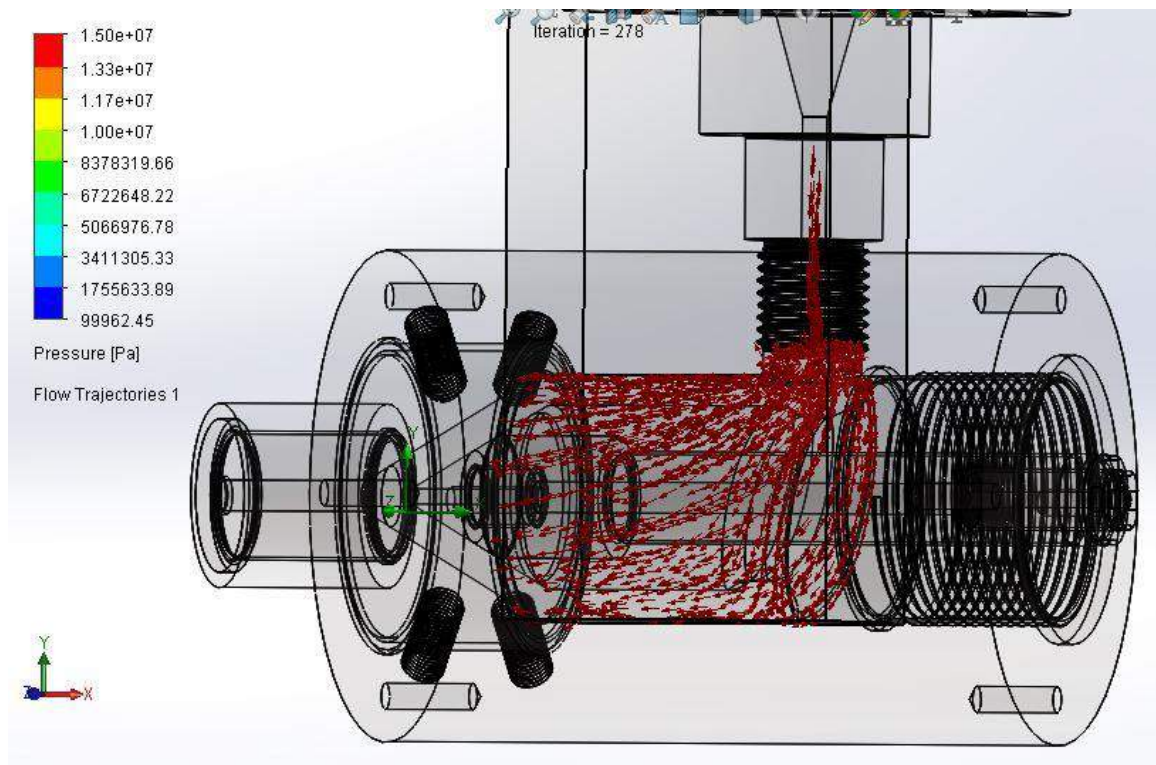
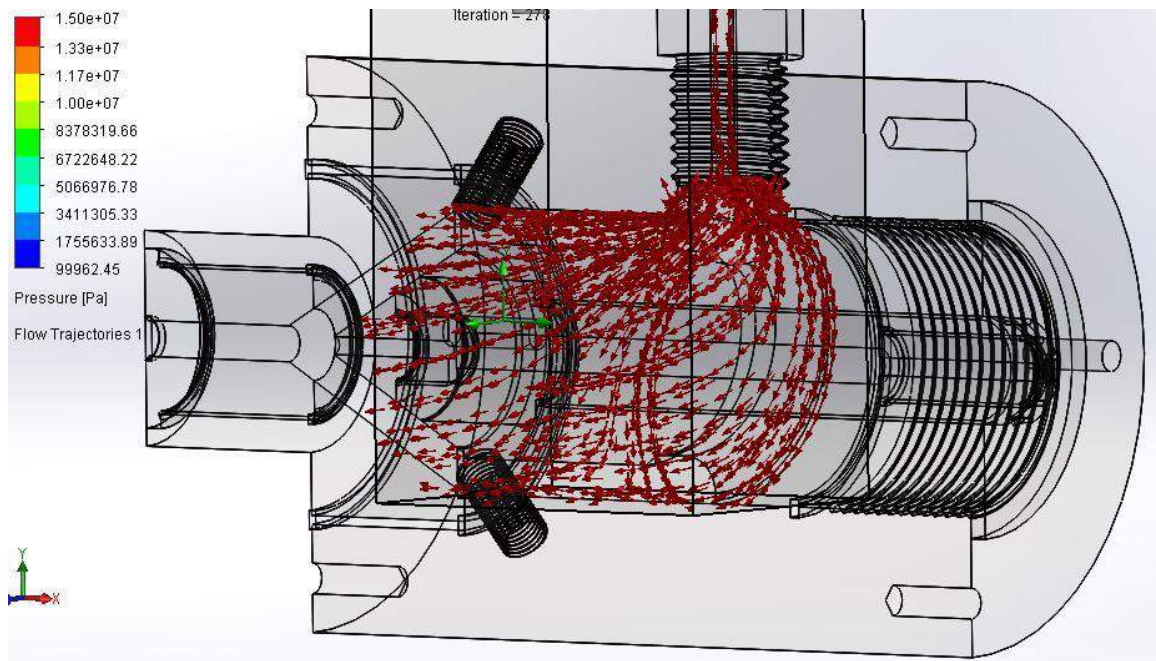
Figura 4-41: Diseño del mandril.

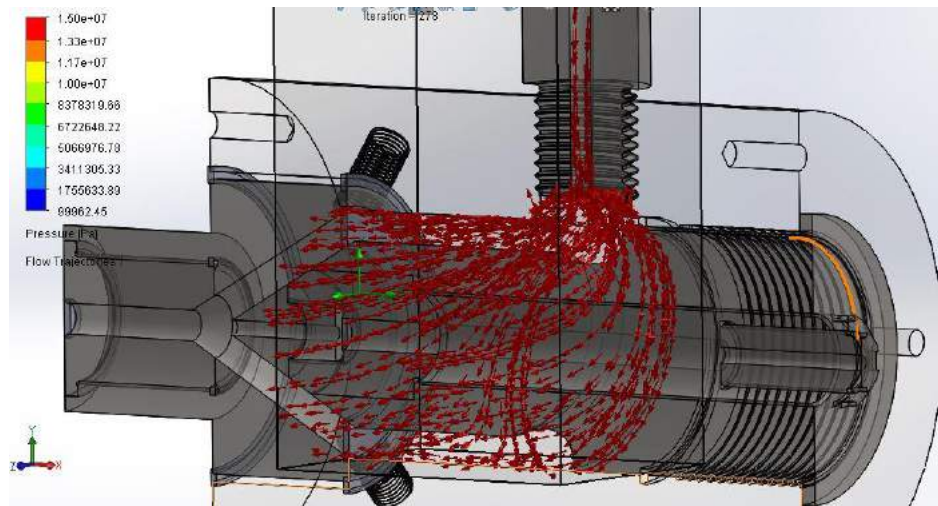
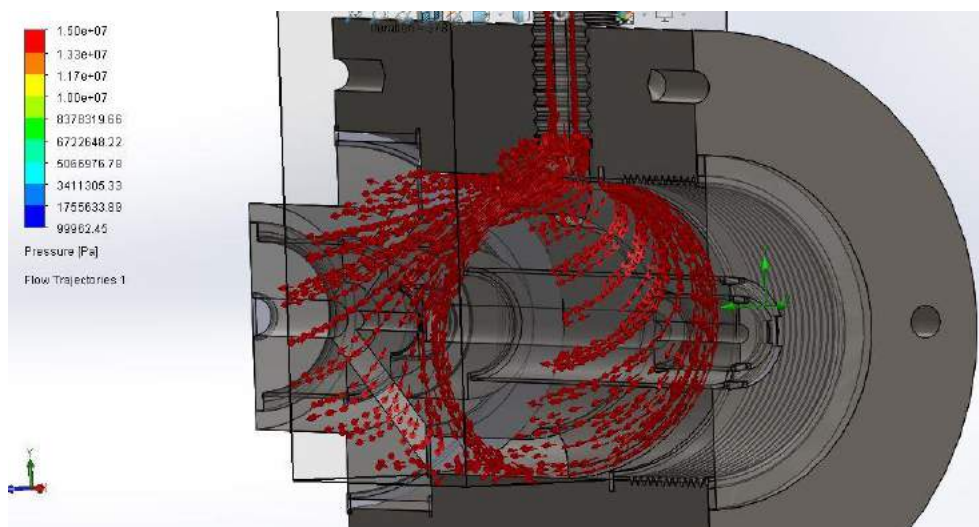
El interior del mandril se encuentra roscado para colocar los componentes que actúan como reguladores de la caída de presión en la zona anular cónica y, roscados a este último, los elementos centradores del alma del electrodo.

Fijar todos los elementos roscados al housing, presenta la ventaja de poder centrar los mismos y que se encuentren todos los componentes con ejes centrales colineales.

Para poder comprobar que el mandril cumple con su función de poder conducir el flujo de mezcla de revestimiento hacia la boquilla, se simuló con SolidWorks Flow Simulation un caso en donde se setea el polímero Polipropileno fluyendo por el canal

de entrada de la mezcla para poder observar sus movimientos al ingresar al housing.
Los resultados se pueden observar a continuación:

**Figura 4-42:** Simulación del cabezal.**Figura 4-43:** Simulación del cabezal

**Figura 4-44:** Simulación del cabezal**Figura 4-45:** Simulación del cabezal

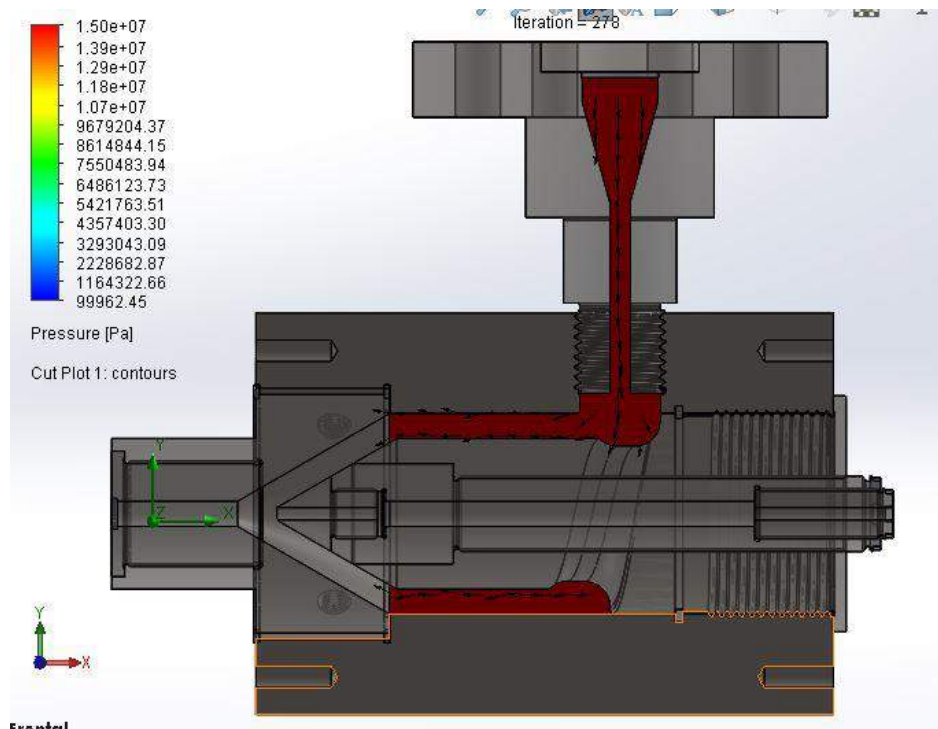


Figura 4-46: Simulación del cabezal

Como puede observarse, la dirección del flujo de PP en el canal anular recto es hacia la salida. Por su parte, la presión del flujo se encuentra mantenida sobre los tramos en 15 Mpa debido a que el solver no tiene en cuenta caídas de presión para esta configuración y análisis.

Puede observarse cómo la hélice mecanizada en la entrada del mandril provoca que el flujo se distribuya uniformemente a lo largo de todo el canal anular de extrusión, provocando una extrusión con buenos resultados dimensionales, sin defectos superficiales (debido a que los esfuerzos de corte son muy inferiores relativamente al valor máximo de esfuerzo de corte) y con buena calidad geométrica.

4.2.5.6 Regulación interior

Como se pudo observar anteriormente, se plantea la posibilidad de ajustar la caída de presión para obtener así un caudal que se encuentre lo más cercano al caudal de producción deseado, debido a diferencias entre los parámetros reológicos de la mezcla en la realidad con respecto a los cálculos teóricos realizados.

En la realidad, parámetros como la viscosidad, densidad, temperatura real del fluido, no son exactamente iguales a los valores utilizados en los cálculos teóricos. Por esta razón, los valores reales de caudal obtenido pueden variar (en pequeños porcentajes) con respecto al caudal deseado.

Por esta razón, se propone, a partir de conocimiento de la fórmula de caudal volumétrico ($Q = K \times \text{Caída de presión} / \text{viscosidad}$), ajustar la caída de presión del tramo cónico anular para poder variar de esta manera el caudal, y por lo tanto velocidad de extrusión, generado, en un rango determinado que permita tener una pequeña variación.

En caso de que se desee regular aún más el caudal que se encuentra circulando por el cabezal de extrusión, su variación deberá hacerse directamente desde los parámetros de extrusión seteados en el tornillo extrusor (RPM, Potencia, etc)

El tramo para la regulación posee la siguiente geometría, estando el mismo roscado al mandril para asegurar concentricidad:

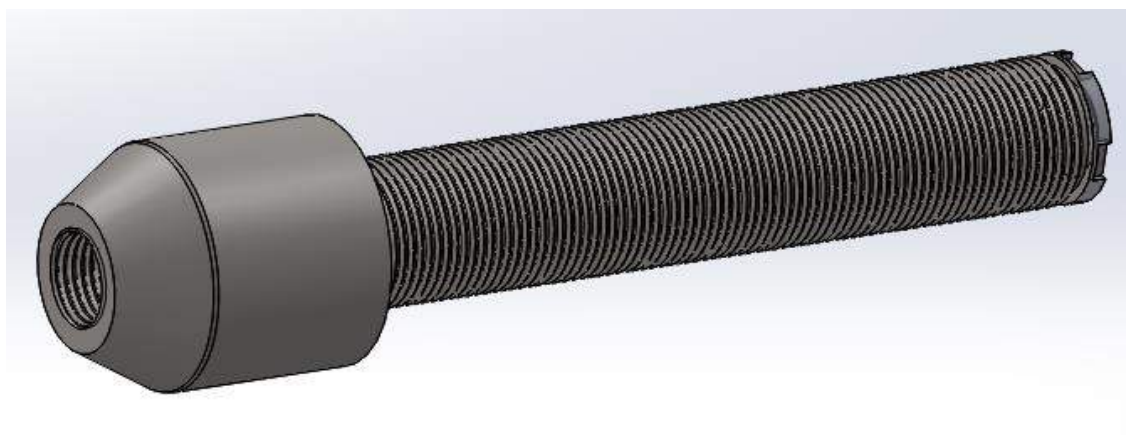


Figura 4-47: Tramo para la regulación.

Montado en el ensamblaje:

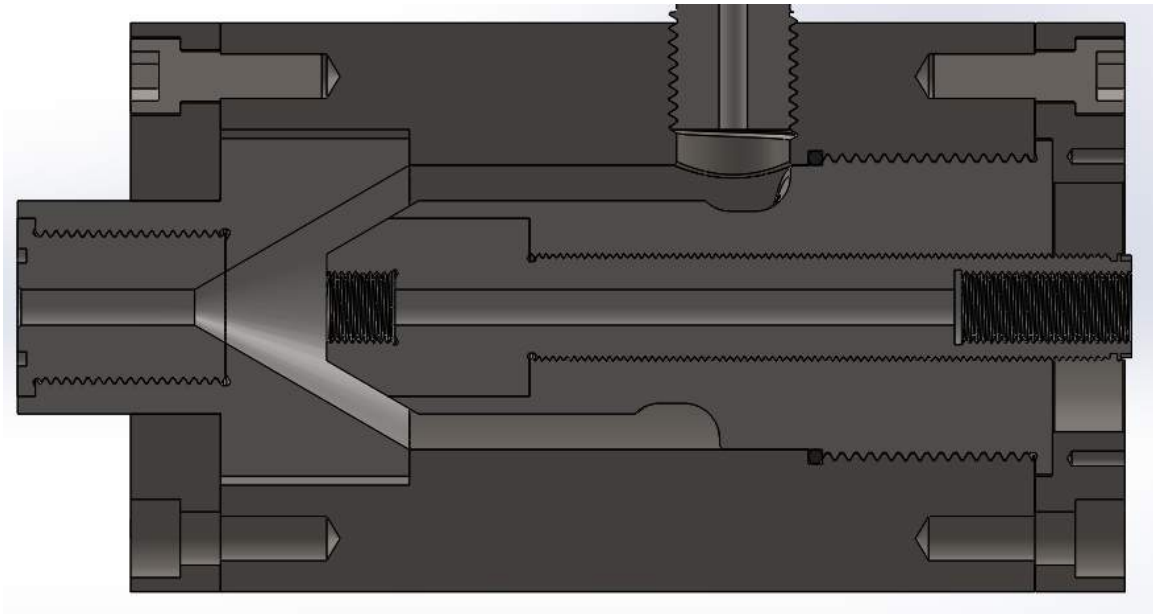


Figura 4-48: Ensamblaje.

El mismo posee un ajuste muy fino para poder deslizarse sobre el mandril (a partir del ajuste o desajuste de la rosca central) para poder regular el canal de extrusión.

En su interior, posee dos roscas (una en el sector delantero y otra en el trasero) para poder colocar los centradores del alma del electrodo. Al estar todos los componentes roscados entre sí, se consigue una concéntrica de los mismos con respecto al housing, logrando así que los tramos se encuentren centrados.

La regulación se realiza mediante la rosca de paso fino M30 x 2 mm, pudiendo acercar el tramo de regulación prácticamente hasta la pared de la boquilla interior. El límite de acercamiento se realiza a partir de la imposibilidad de seguir roscando el tramo, debido a que el espacio para colocar la herramienta de ajuste / desajuste en la parte trasera del tramo de regulación llega al borde del inicio de mandril, imposibilitando continuar.

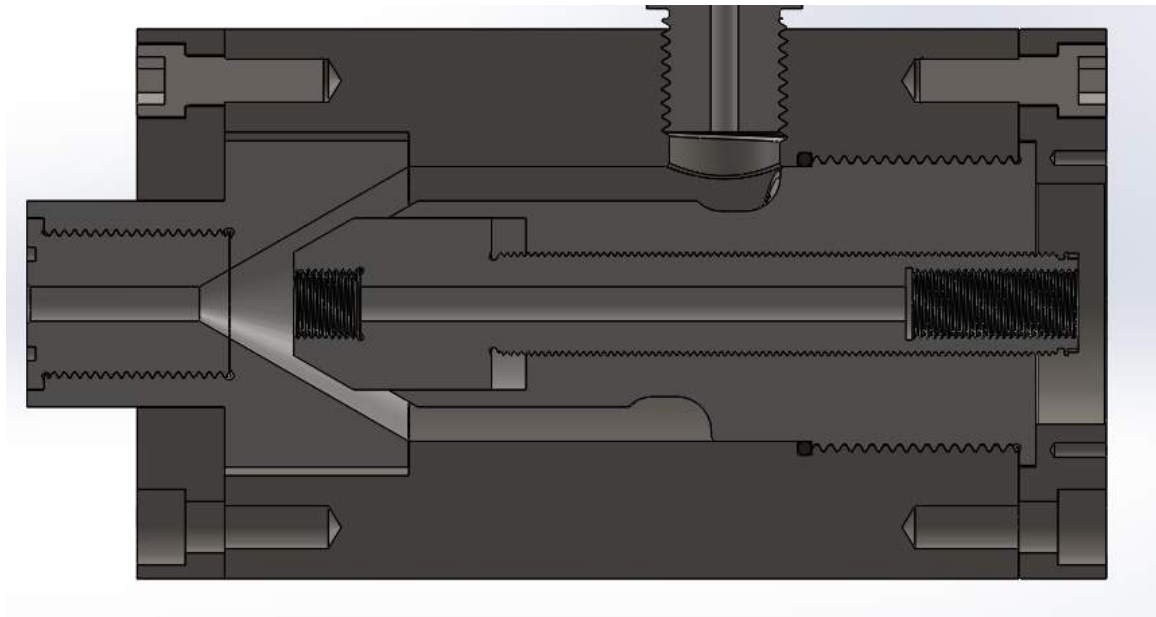


Figura 4-49: Ensamblaje.

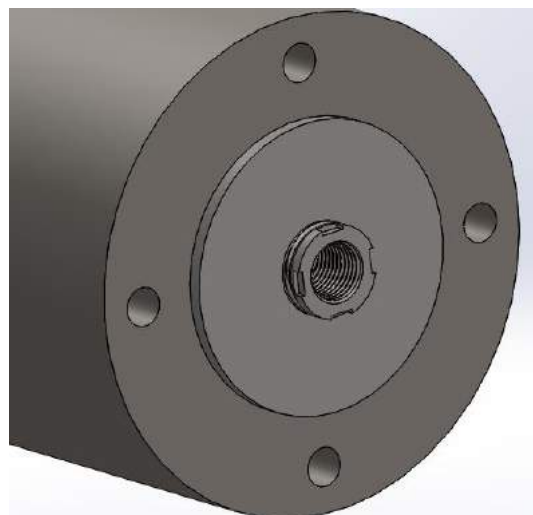


Figura 4-50: Diseño final

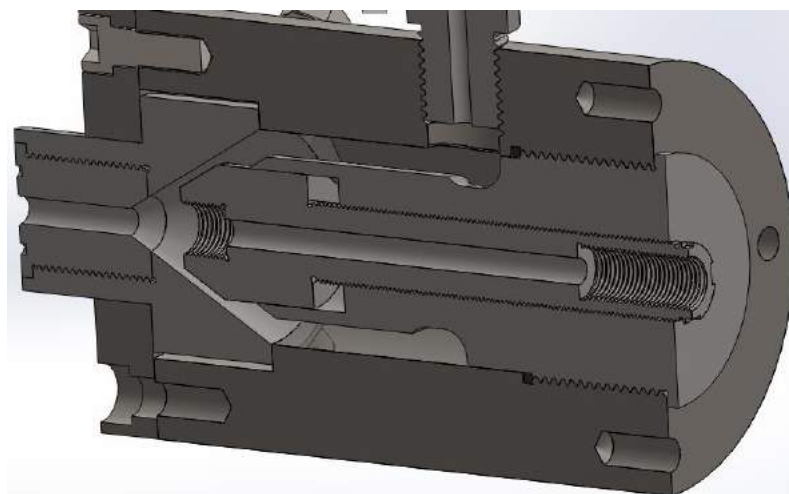


Figura 4-51: Diseño final.

Para conocer cuánta caída de presión y, por lo tanto, porcentaje de caudal es posible regular, se realizan nuevamente los cálculos, teniendo en cuenta que la máxima diferencia aceptable es de 5% con respecto al caudal teórico. Se aclara que al variar el espesor del canal, la velocidad de cizalla y por lo tanto la viscosidad del tramo también varía, por lo que en los cálculos también se ajustarán los valores correspondientes.

- **Regulando el caudal para lograr un canal anular cónico de 5 mm de espesor (5 mm de holgura entre el mandril y la boquilla interior)**

Tabla 4-17: Resultados de la regulación.

Caudal teórico de prod	0.000005411255411	m3/s
	0.0003244462774	[m3/min]
Q calculado desde el tornillo con tramo cónico reducido (Q1*)	0.000005407437957	[m3/seg]
CAIDA DE PRESION TOTAL - SECCIÓN REDUCIDA	3333310.524	Pa
	3.333310524	Mpa
Q calculado para el cabezal (Q2*) - con sección cónica reducida	0.00000535373044	[m3/seg]
Diferencia entre Q1* y Q2*	1.003179319	%
	1003179.319	[cm3/seg]
Diferencia entre Qteorico y Q1*	0.07054656111	%
	70546.56111	[cm3/seg]
Diferencia entre Qteorico y Q2*	1.063061468	%
	1063061.468	[cm3/seg]

- **Regulando el caudal para lograr un canal anular cónico de 3 mm de espesor (3 mm de holgura entre el mandril y la boquilla interior):**

Tabla 4-18: Resultados de la regulación.

Caudal teórico de prod	0.000005411255411	m3/s
Q calculado desde el tornillo con tramo cónico reducido (Q1*)	0.0003240457466	[m3/min]
	0.000005400762443	[m3/seg]
CAIDA DE PRESION TOTAL - SECCIÓN REDUCIDA	3880180.896	Pa
	3.880180896	Mpa
Q calculado para el cabezal (Q2*) - con sección cónica reducida	0.000005239806998	[m3/seg]
Diferencia entre Q1* y Q2*	3.071781935	%
	3071781.935	[cm3/seg]
Diferencia entre Qteorico y Q1*	0.1939100493	%
	193910.0493	[cm3/seg]
Diferencia entre Qteorico y Q2*	3.168366669	%
	3168366.669	[cm3/seg]

- **Regulando el caudal para lograr un canal anular cónico de 2 mm de espesor (2 mm de holgura entre el mandril y la boquilla interior):**

Tabla 4-19: Resultados de la regulación.

Caudal teórico de prod	0.000005411255411	m3/s
Q calculado desde el tornillo con tramo cónico reducido (Q1*)	0.0003228384169	[m3/min]
	0.000005380640281	[m3/seg]
CAIDA DE PRESION TOTAL - SECCIÓN REDUCIDA	5536835.4	Pa
	5.5368354	Mpa
Q calculado para el cabezal (Q2*) - con sección cónica reducida	0.000005044058507	[m3/seg]
Diferencia entre Q1* y Q2*	6.672836439	%
	6672836.439	[cm3/seg]
Diferencia entre Qteorico y Q1*	0.5657676009	%
	565767.6009	[cm3/seg]
Diferencia entre Qteorico y Q2*	6.785798786	%
	6785798.786	[cm3/seg]

Se observa que al reducir el canal, el caudal que saldría del cabezal sería menor. Esto es posible de explicar ya que, aunque la caída de presión sea mayor (se elevó a 5,53 Mpa para el caso del canal con 2 mm de espesor), el factor más influyente en la

fórmula de caudal ($Q = K \times \text{Caída de presión} / \text{viscosidad}$) es el factor K, el cual varía al disminuir el ancho del canal. Si se observan los resultados, el orden de magnitud de K total cuando el canal es de 2 mm de ancho disminuye en 1 unidad con respecto al valor cuando el canal es de 10 mm:

Tabla 4-20: K total

KTOTAL		0.000000001178072425	[m3]
KTOTAL - CON CANAL CÓNICO REDUCIDO		0.0000000006377001843	[m3]

De esta forma, al disminuir el canal de extrusión, aumenta la caída de presión pero al mismo tiempo también disminuye el factor K, el cual aporta proporcionalmente también al resultado final del caudal.

Se puede observar que al colocar un canal de 2 mm de ancho, la diferencia entre el caudal teórico y el que fluye por el cabezal es mayor al 6%, por lo que se recomienda utilizar canales mayores a este mencionado.

Entonces, al tener variaciones por ejemplo en las características de la mezcla de extrusión como en la densidad, viscosidad o temperatura, y es necesario ajustar finamente el caudal que se extruirá por el cabezal con respecto al teórico (debido a que este último resulta menor al que en un principio se tuvo en cuenta), es posible regular el canal para llevar el caudal de extrusión del cabezal a una diferencia menor al 5% con respecto a éste último.

Por su parte, el caudal calculado con la fórmula que tiene en cuenta el flujo generado en el tornillo, se encuentra siempre por debajo de 1% de diferencia con respecto al teórico.

4.2.5.7 Centraores del alma del electrodo

Como anteriormente se mencionó, los centraores se roscan en el inicio y final del regulador interior, de modo de poder centrar el alma del electrodo que se encuentra pasando por el interior del cabezal.

Como característica, los centraores son intercambiables para poder colocar diámetros de alma de electrodos mayores o menores según deseo del usuario.

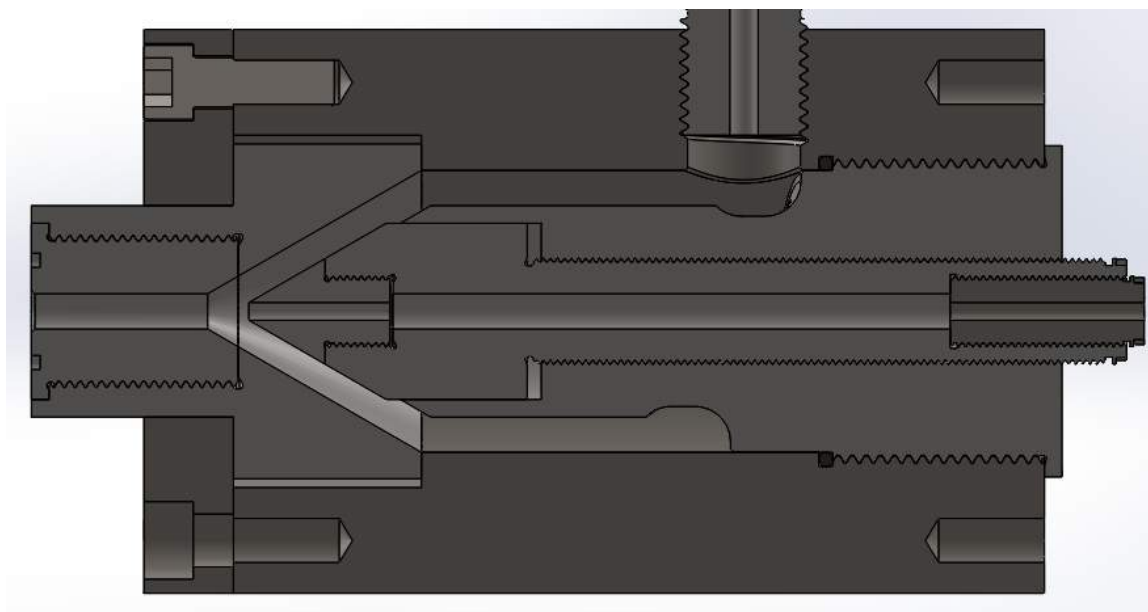


Figura 4-52: Centradores del electrodo.

De esta manera, el centrador delantero (a la izquierda en la imagen) finaliza el cono para el tramo de sección anular, derivando el flujo de la mezcla de extrusión al encuentro con el alma del electrodo.

Al tener la posibilidad de regular tanto los diámetros de la boquilla de extrusión, los diámetros de alma de electrodo de los centradores delantero y trasero y la caída de presión dentro del canal anular cónico, el cabezal de extrusión es utilizable para diferentes tipos de diámetros de electrodo con diferentes tamaños de alma de electrodo.

4.2.5.8 Tapas delantera y trasera

Para el cerrado y presión de los elementos componentes del cabezal interiores, se utilizan tapas de 1" de espesor roscadas al housing con tornillos M14, bajo el mismo criterio de cálculo que para los reguladores de concentricidad de la boquilla interior.

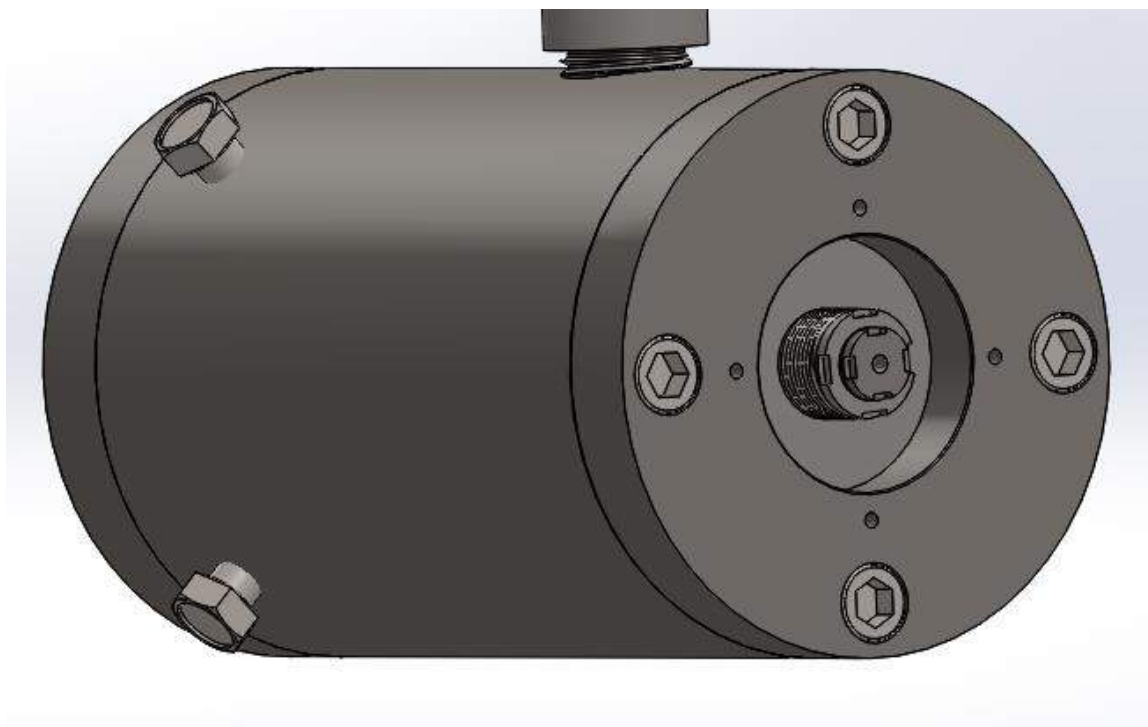


Figura 4-53: Tapa trasera.

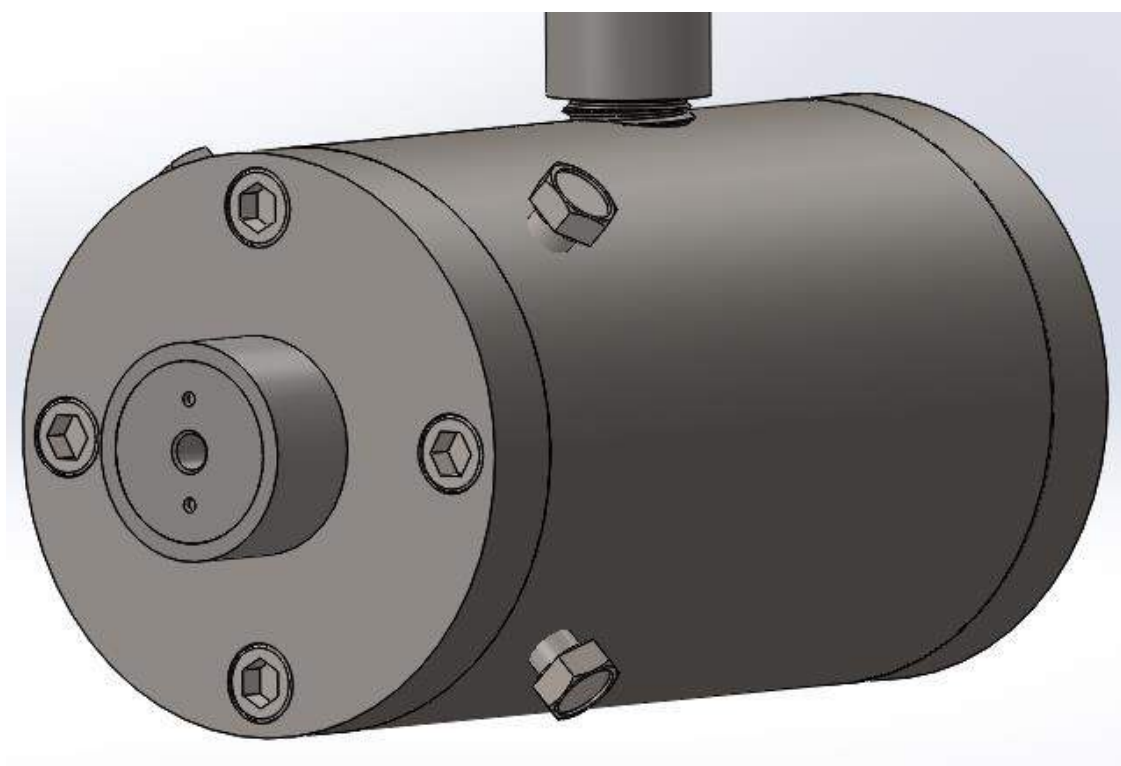


Figura 4-54: Tapa delantera.

4.2.5.9 Tapa de seguridad

Para evitar que la regulación interior (para el canal anular cónico) pueda utilizarse constantemente, se coloca una tapa de seguridad que deberá ser colocada o retirada al querer realizar la regulación.

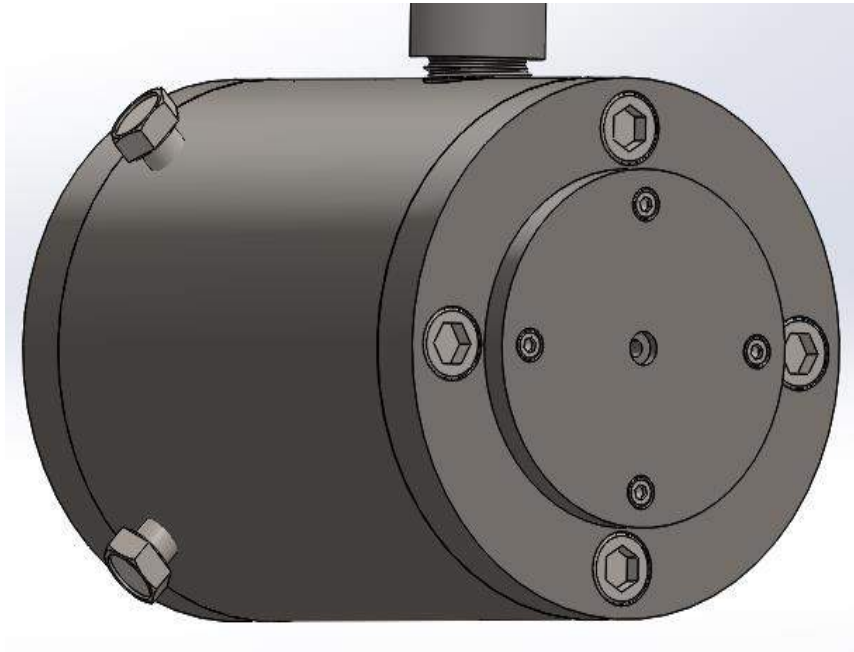


Figura 4-55: Tapa de seguridad.

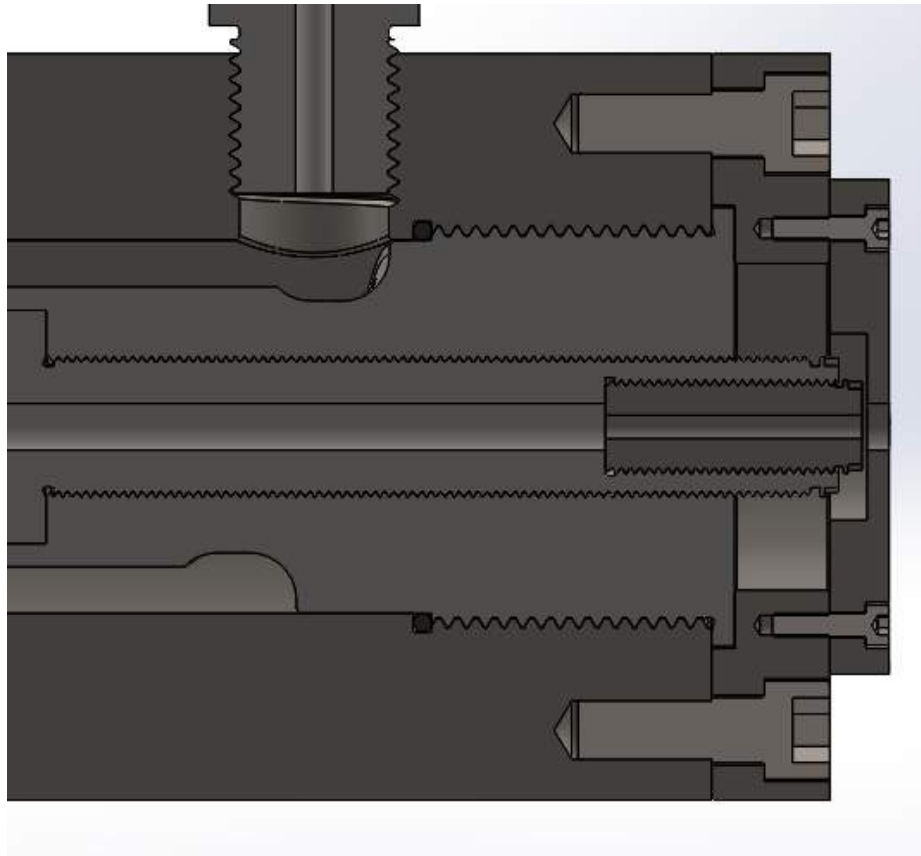


Figura 4-56: Tapa de seguridad.

4.2.6 Ensamblaje final del cabezal

A continuación, se muestran imágenes del cabezal de extrusión en su ensamble final.

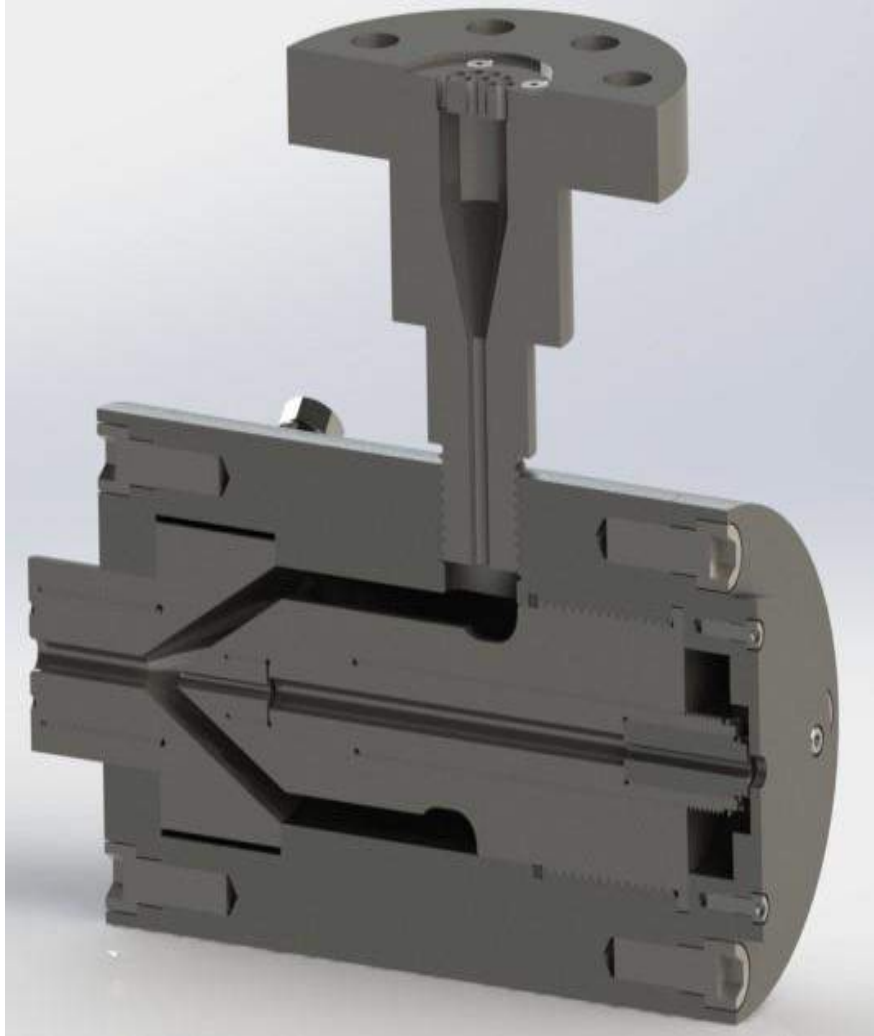


Figura 4-57: Diseño final.

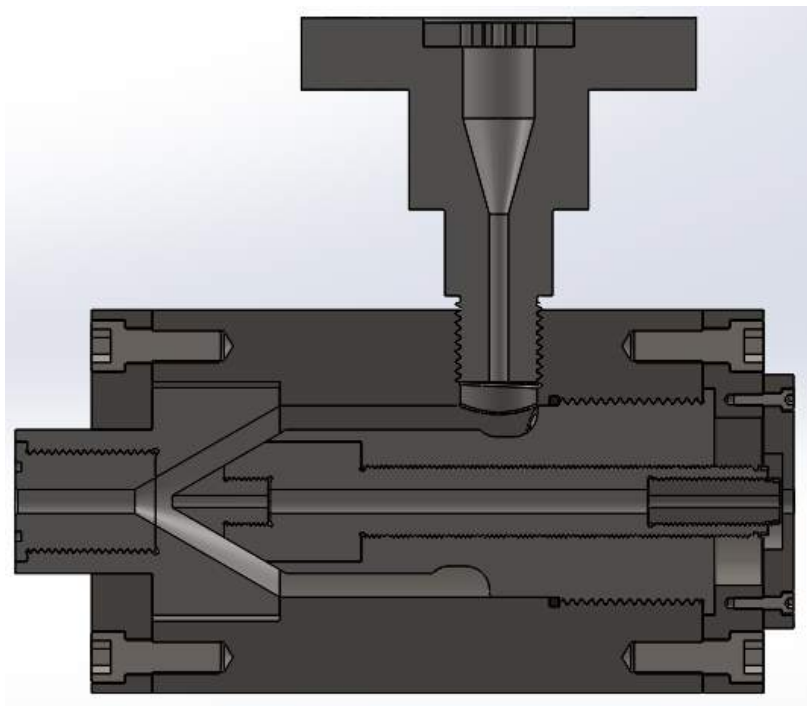


Figura 4-58: Diseño final.

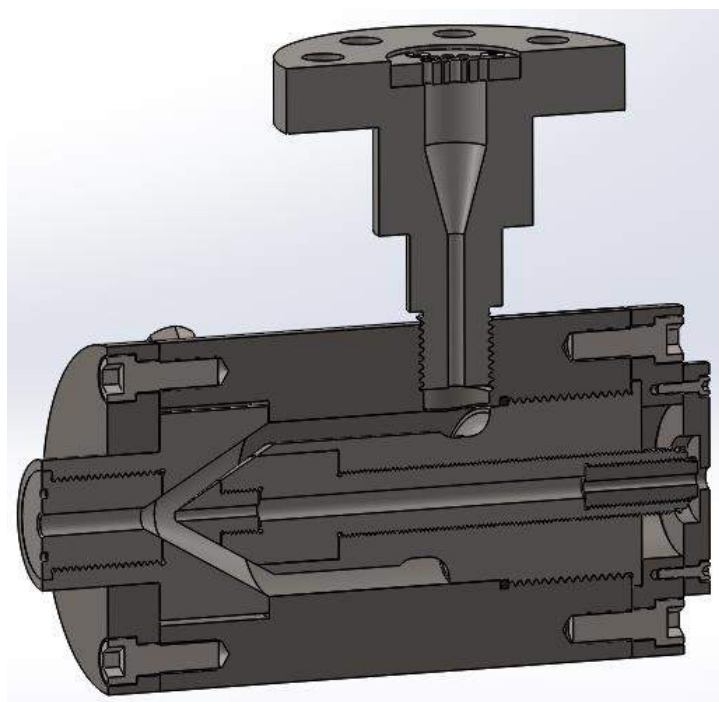


Figura 4-59: Diseño final.

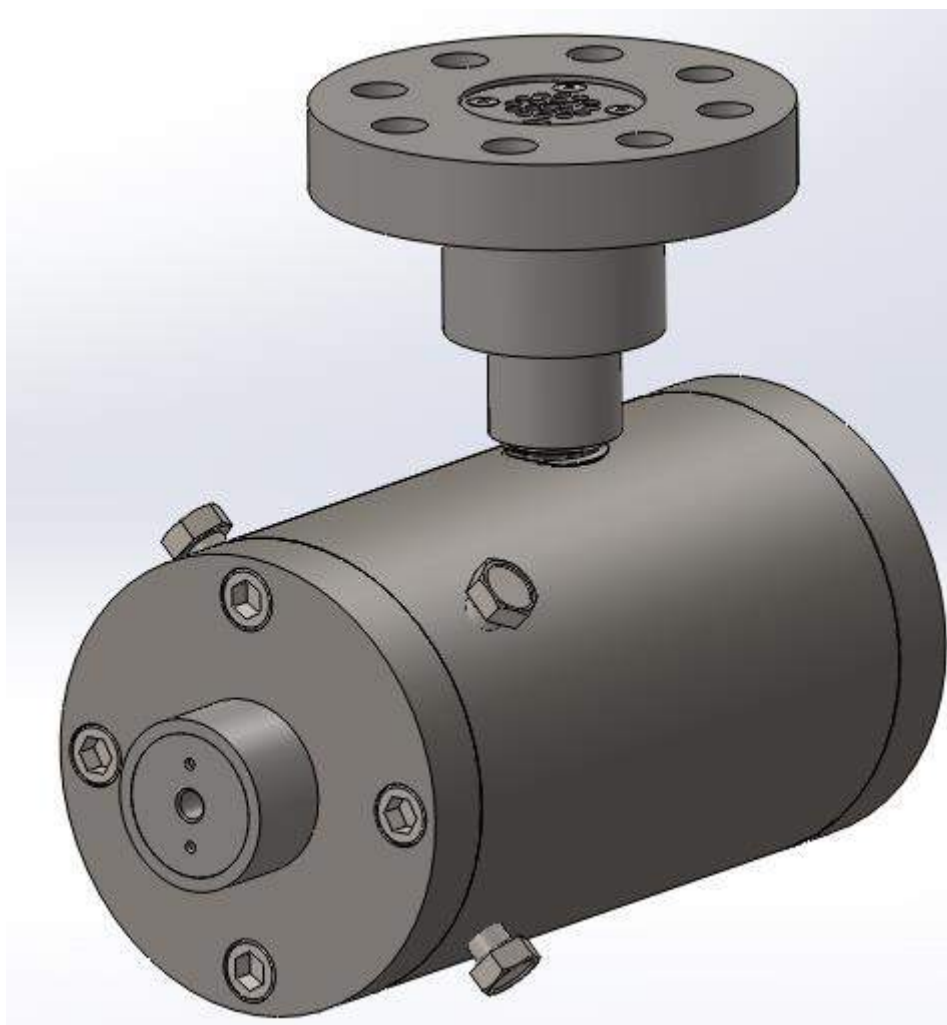


Figura 4-60: Diseño final.

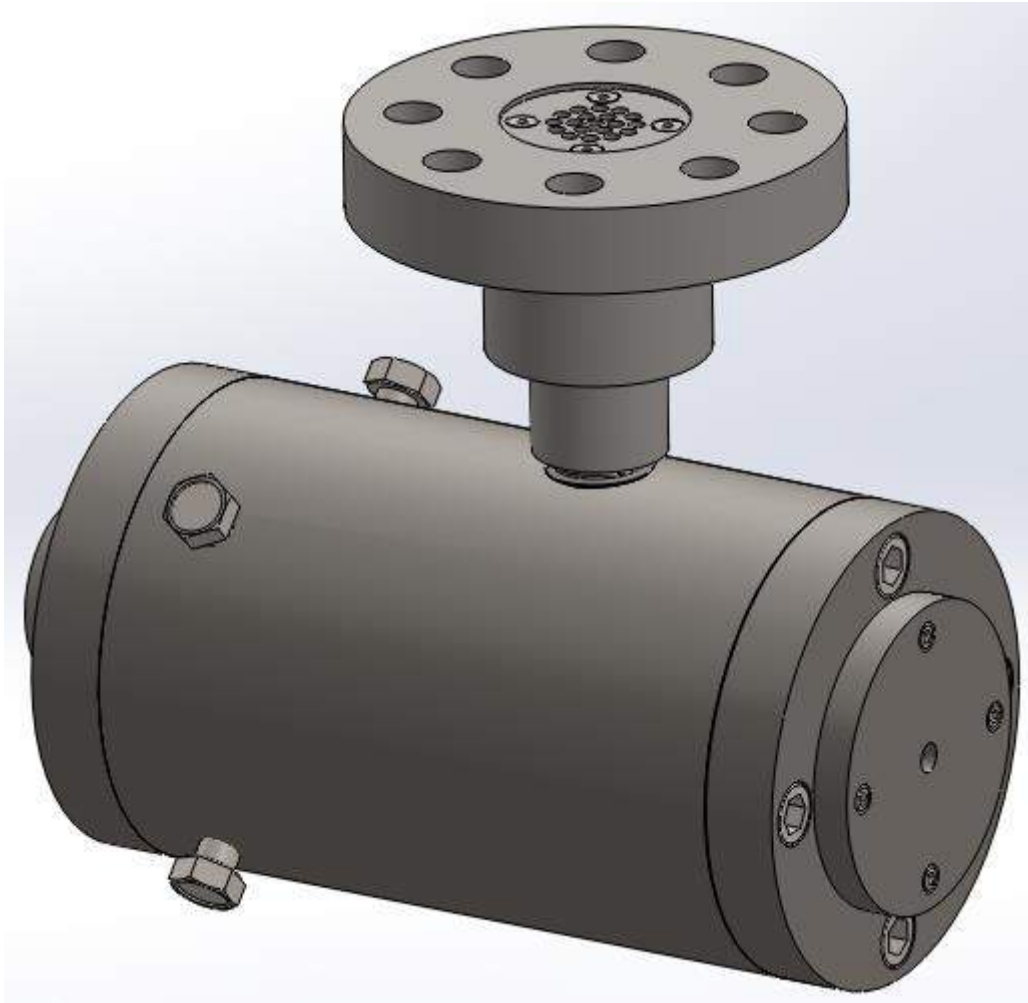


Figura 4-61: Diseño final.

4.3 Sistema de enfriamiento

Para el sistema de enfriamiento se pensó en la posibilidad de utilizar: una tina de agua, enfriamiento anular con aire o un spray (mezcla de agua y aire). Para los 3 casos se comenzó con el cálculo del tiempo, y distancia equivalente, que se demoraría en enfriar el electrodo por debajo de la temperatura de fusión (130°C). Dado que la temperatura del mismo no es uniforme radialmente y que el proceso se extiende en el tiempo, se utilizó el modelo de transferencia de calor transitoria explicitado el capítulo 4 del libro “Transferencia de calor y masa” [1].

Se parte desde un balance de energía:

(Transferencia de calor hacia el cuerpo durante dt) = (Incremento de la energía en dt)

$$h A (T_{\infty} - T) dt = mc_p dT \quad (4.21)$$

La solución de dicha ecuación diferencial es una serie por lo que para simplificar el problema se elige calcular la temperatura en el centro del electrodo con la “aproximación de un término”. Los valores correspondientes al límite polipropileno-alambre y en el exterior del extruido se calculan utilizando las gráficas Heisler. Los resultados para estas dos últimas posiciones, pasados 60 segundos (equivalente a un largo de 3 m), se muestran en la siguiente gráfica.

Tabla 4-21: Comparación de sistemas de enfriamiento

Comparación resultados	T centro pp [°C]	T ext. pp [°C]
Agua	57.67	21.35
Aire	97.25	49.08
Lluvia de agua	60.37	26.18
Tiempo de enfriamiento del electrodo (T): 60 segundos		
Posición del electrodo en el sistema de enfriamiento al tiempo T: 3 m		

Se puede ver que el enfriamiento más efectivo resulta ser la inmersión en agua. Si también se pondera facilidad de construcción y diseño, particularmente útil para un sistema de laboratorio como es este caso, resulta el mejor sistema y es el elegido como solución final.

Por otro lado, quizás se piense que sumergir el electrodo en agua es contraproducente ya que después se almacenaría húmedo. Sin embargo, como se ha visto en el [Capítulo 2](#) luego del proceso de conformado los mismos se secan en un horno, por lo que este aspecto no representará un problema.

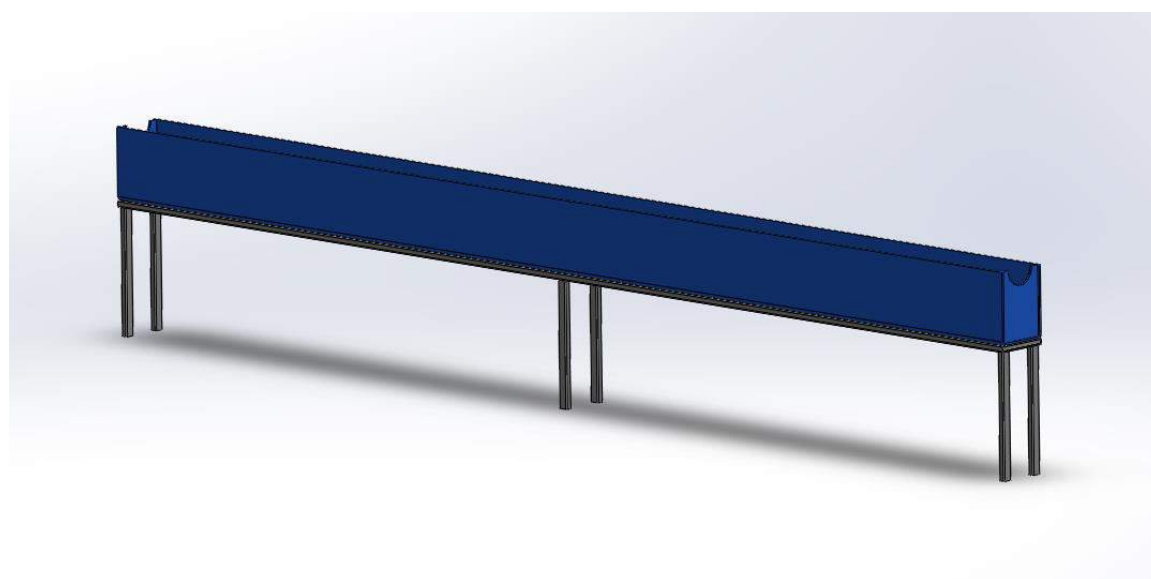


Figura 4-62: Tina de enfriamiento.

Una vez elegido dicho sistema se realiza un cálculo para determinar a qué distancia se puede colocar el primer soporte dentro de la tina para no deformar el material extruido. Transcurridos 40 s de enfriamiento, la temperatura en el límite metal-polipropileno es de 89,25 °C y en el exterior 22.47 °C (Ver [Anexo A “Memorias de cálculo”](#)). Estos valores son bastante inferiores a la temperatura de fusión. Teniendo en cuenta la velocidad de extrusión, 0.05 m/s, el primer soporte se podrá colocar a los 2 m.

Como el alambre no entra directamente en posición horizontal, sino que primero cae y luego se mantiene en dicha posición, el soporte se coloca 250 mm más a la derecha como se ve en la siguiente imagen.

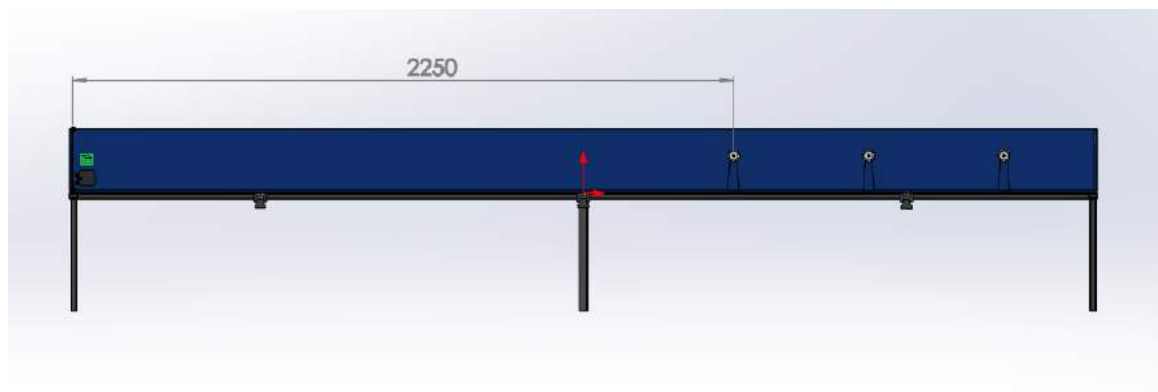


Figura 4-63: Soporte en la tina de enfriamiento.

El ensamble del soporte consta de un plegado, un eje de acero inoxidable y el soporte propiamente dicho que gira loco.

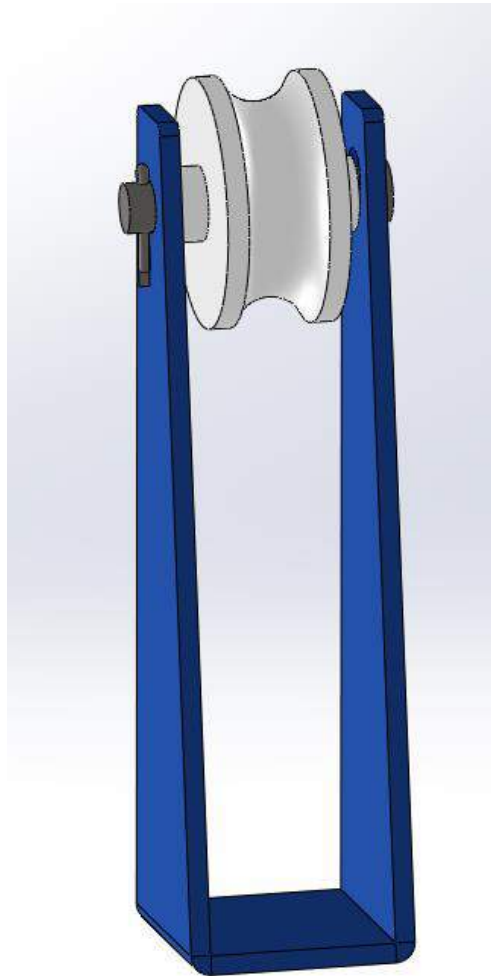


Figura 4-64: Soporte.

Al soporte, como se ve en la imagen anterior, se le realiza una muesca semicircular para conducir el electrodo sin deformarlo. Se confeccionará en polietileno de alto peso molecular ya que tiene alta resistencia mecánica, rigidez, dureza, bajo coeficiente de rozamiento, muy baja absorción de humedad y gran facilidad de mecanizado.

Además, para facilitar el vaciado de la tina, se sueldan medias cuplas en la base de la tina sobre las que se pueden introducir tapones.



Figura 4-65: Media cupla y tapón.

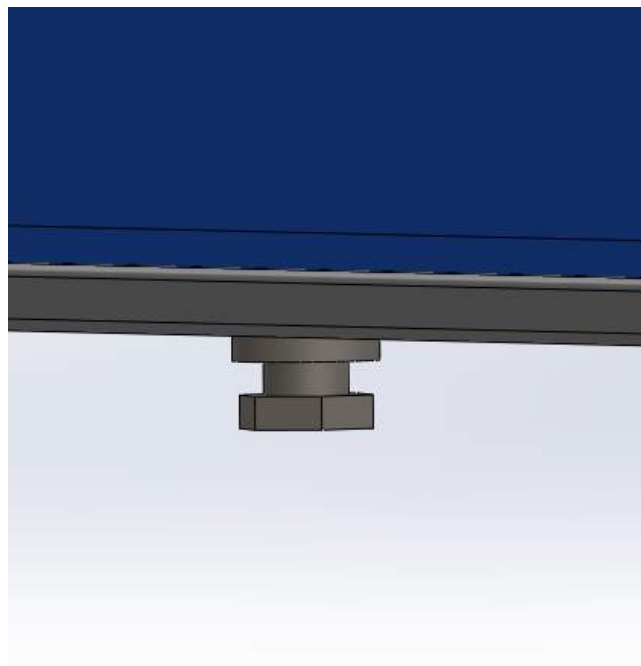


Figura 4-66: Media cupla y tapón.

Al pensar el diseño nos encontramos con dos inconvenientes:

1. El agua de la tina a medida que pasa el tiempo se va a ir calentando y el intercambio de calor va a ser cada vez menor.
2. La zona del agua que rodea el electrodo va a estar considerablemente más caliente que el resto por lo que la transferencia de calor va a ser notablemente menor a la calculada.

Para el primer punto se realizó el cálculo de la temperatura final del agua luego del enfriamiento del electrodo. Considerando que el largo final del electrodo es 10 m, una tina de 150x150x3000 mm y calculando el Q perdido siguiendo el procedimiento indicado en el libro [1], luego de 200 s el agua ha absorbido 278643.75 J que se corresponden con un 25.99 °C (tomando 25 °C como temperatura inicial).

Dado que luego de los 3 m de enfriamiento el límite entre el alambre y el polipropileno tiene 57.66 °C (muy por debajo de la temperatura de fusión) y que la temperatura del agua aumenta solo un grado, no se justifica la incorporación de un intercambiador de calor.

Para el segundo aspecto mencionado, se optó por una solución sencilla acorde al tipo de instalación en que se va a utilizar la extrusora: se eligió un agitador de agua compacto marca Sicce para acuarios diseñado para un volumen de 60 a 120 l. Al tener un imán, la instalación es sencilla dado que la chapa es ferromagnética.

Key Features
VOYAGER NANO 1000 - 2000
Uso sumergido
Bajo consumo de energía: ¡SOLO 2,8 y 3W respectivamente!
Rotor autolimpiante por un especial recirculación interna del agua.
Acuarios de agua dulce: Mod. 1000: 60-120 L Mod. 2000: 120-200 L

Figura 4-67: Agitador elegido. Fuente: www.sicce.com



Figura 4-68: Agitador elegido. Fuente: www.sicce.com



Figura 4-69: Agitador elegido. Fuente: www.sicce.com



Figura 4-70: Agitador ubicado en el costado izquierdo.

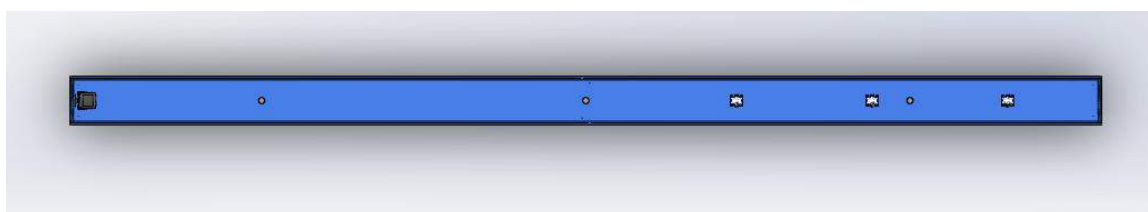


Figura 4-71: Agitador ubicado en el costado izquierdo.

La duda que surge es cuánto calentará el agua el funcionamiento de este dispositivo. Se realizó el cálculo (ver [anexo A](#)) considerando la peor situación en la que toda la potencia suministrada se transforma en calor. Para la potencia indicada en el catálogo (2.8W), el agua se calentará solamente 0.001°C . Por lo tanto, la absorción de esta energía no representa problema alguno para el gran volumen de agua considerado.

4.3.1 Simulaciones

Para verificar que la estructura y las soldaduras resistan el peso y la presión del agua se realizaron simulaciones. Lógicamente como condiciones de contorno se estableció la unión soldada y la presión hidrostática ejercida por el agua.

En un primer momento se colocó un valor bajo del ancho del cordón y el resultado fue que dichas uniones resultaban insuficientes para poder soportar el agua dentro.

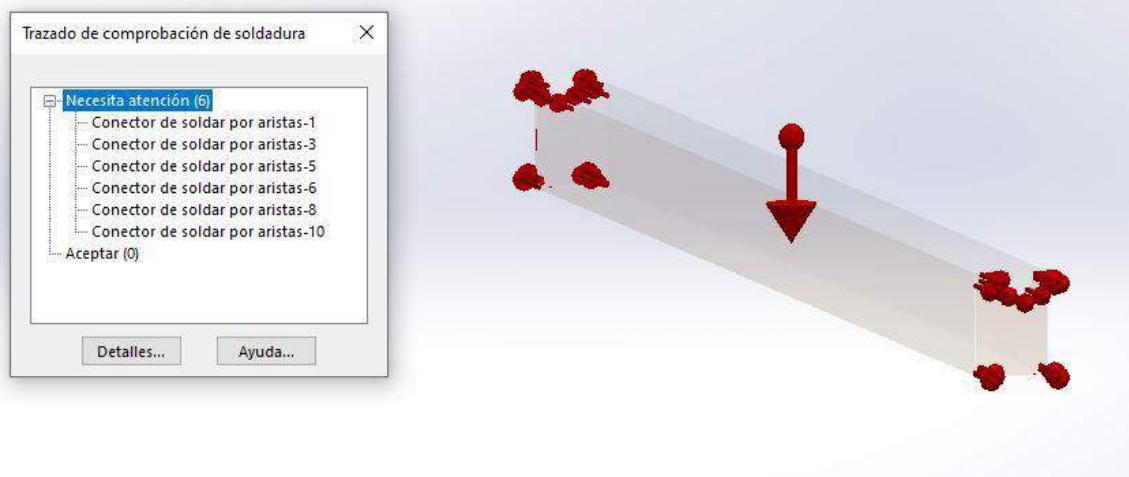


Figura 4-72: Simulación de las soldaduras de la tina.

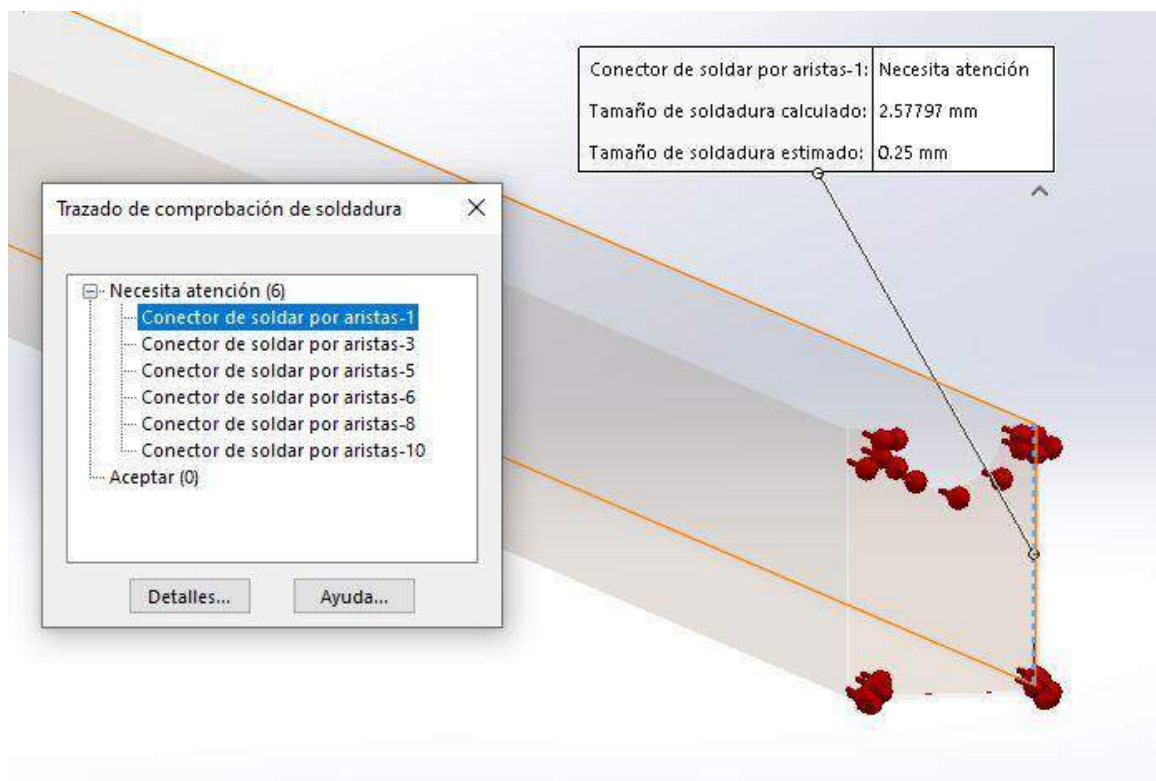


Figura 4-73: Simulación de las soldaduras de la tina.

Luego se agrandó dichos cordones a un valor promedio de uso, teniendo en cuenta diseños similares, y el resultado fue óptimo.

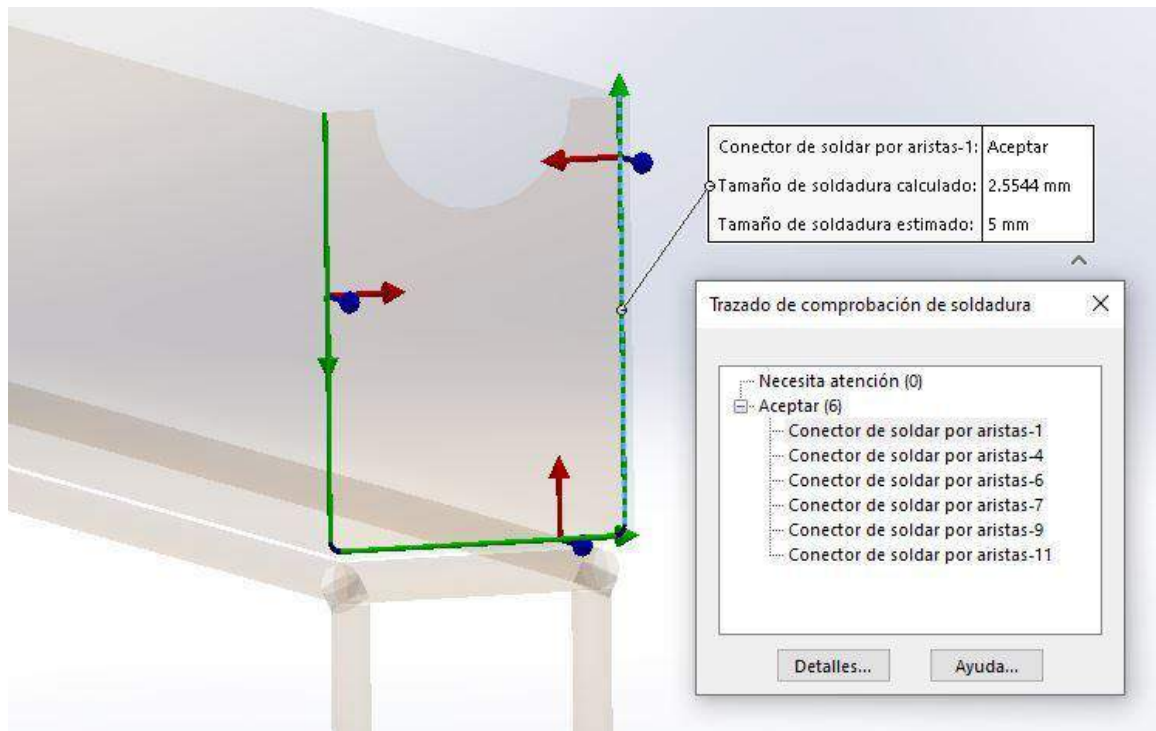


Figura 4-74: Simulación de las soldaduras de la tina.

Además, se graficaron los esfuerzos y los desplazamientos en las chapas como se ven en la siguiente imagen:

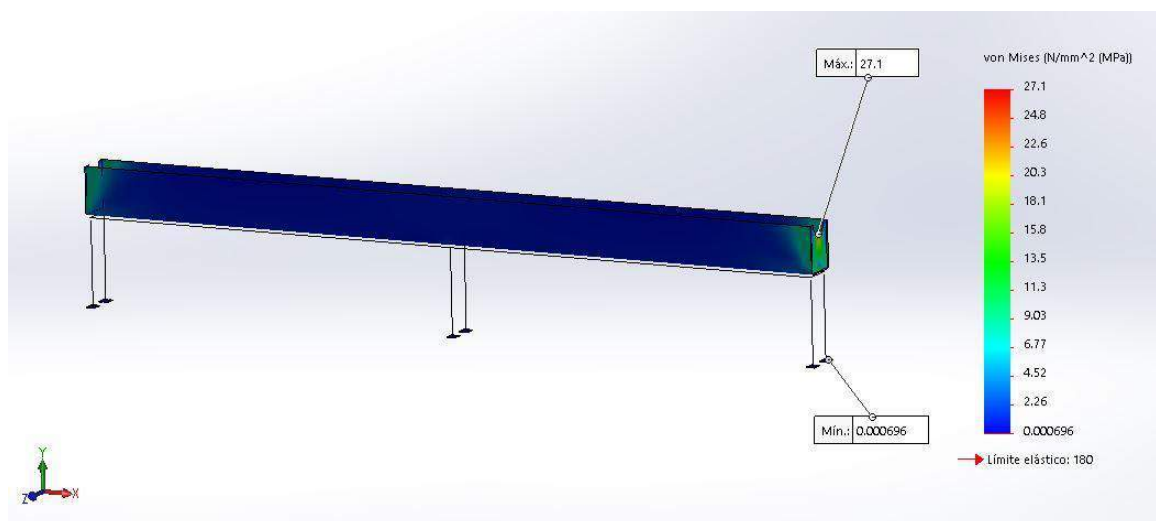


Figura 4-75: Simulación de los esfuerzos.

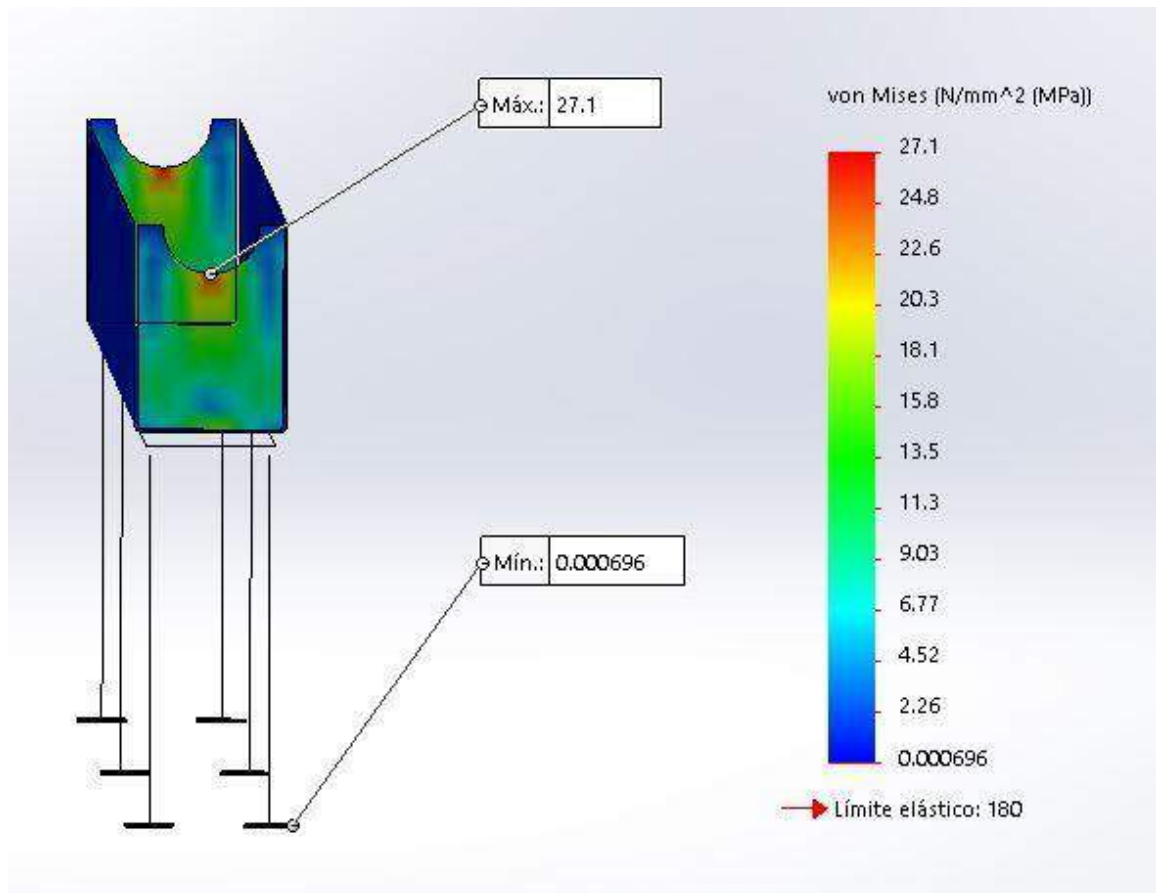


Figura 4-76: Simulación de los esfuerzos.

Como se puede ver el valor de tensión máximo (27.1 Mpa), que se da en la circunferencia lateral cortada para darle pase al electrodo, se mantiene muy por debajo del máximo admisible por el material (180 Mpa).

En las siguientes imágenes también se muestran los desplazamientos lineales. Los máximos valores se encuentran en la zona de esfuerzos máximos y dado que se encuentran dentro de la centésima de milímetro, son despreciables.

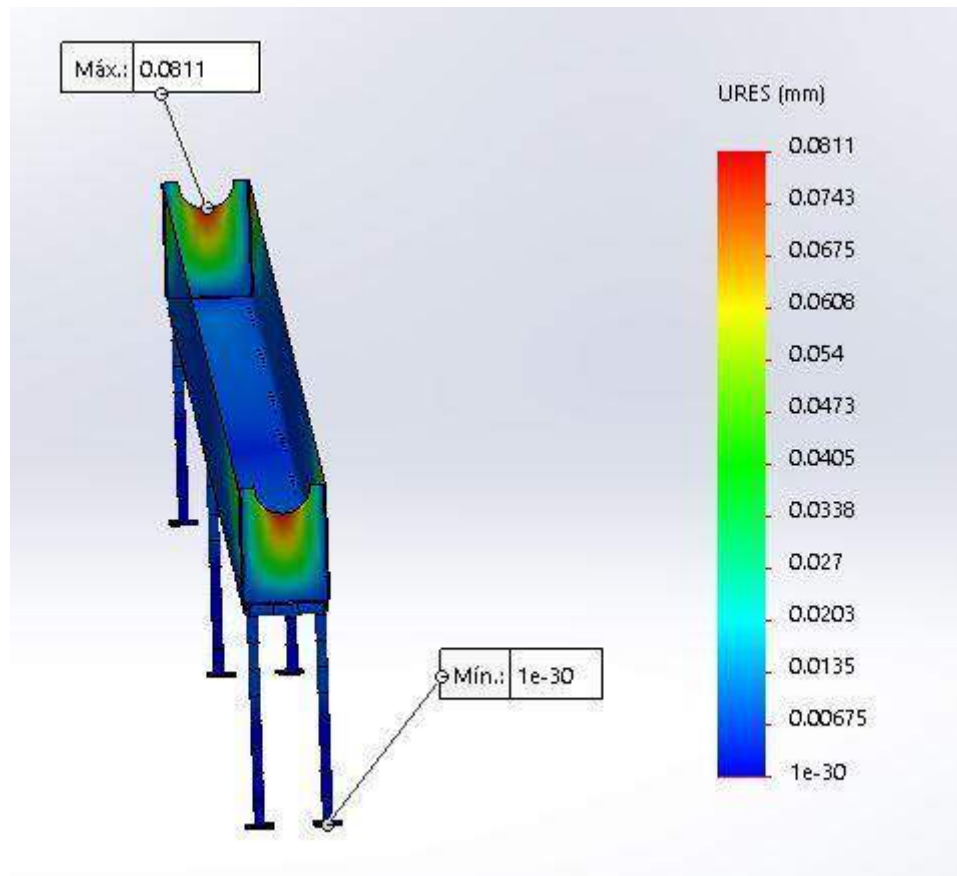


Figura 4-77: Simulación de los desplazamientos.

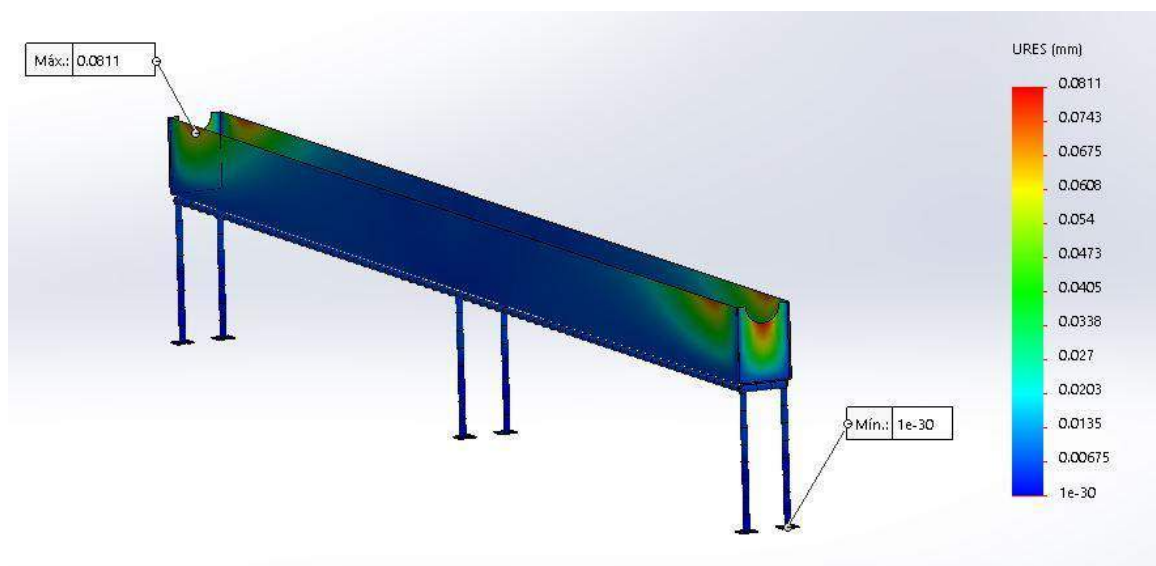


Figura 4-78: Simulación de los desplazamientos.

Analizando los resultados de las simulaciones realizadas se concluye que el diseño resulta satisfactorio para la función establecida.

4.4 Sistema de calentamiento

Para evitar el enfriamiento del material extruido, tanto antes de iniciar el proceso por encontrarse con el acero del cabezal a temperatura ambiente como por la transferencia de calor hacia el exterior por conducción y convección, se utilizan sunchos calefactores. Se realizan a medida en acero (ancho mínimo: 25 mm, diámetro mínimo 40 mm), entregan 4 W/cm^2 si son de chapa y 10 W/cm^2 si son cerámicos.



Figura 4-79: Suncho metálico. Fuente: www.diamore.com.ar

Para poder definir los sunchos a utilizar en primer lugar se realiza el cálculo de la energía necesaria para calentar la masa de acero del cabezal (25 kg housing y 6 kg la entrada) desde los 20°C hasta los 230°C necesarios, en un tiempo propuesto de 15 min. Luego se modeliza el electrodo como un sólido de varias capas y se calcula la transferencia de calor a través de ellas: por conducción a través del metal del cabezal y por convección del cabezal hacia el aire atmosférico.

Nota: La siguiente imagen se realizó a modo esquemático, no representa las dimensiones reales

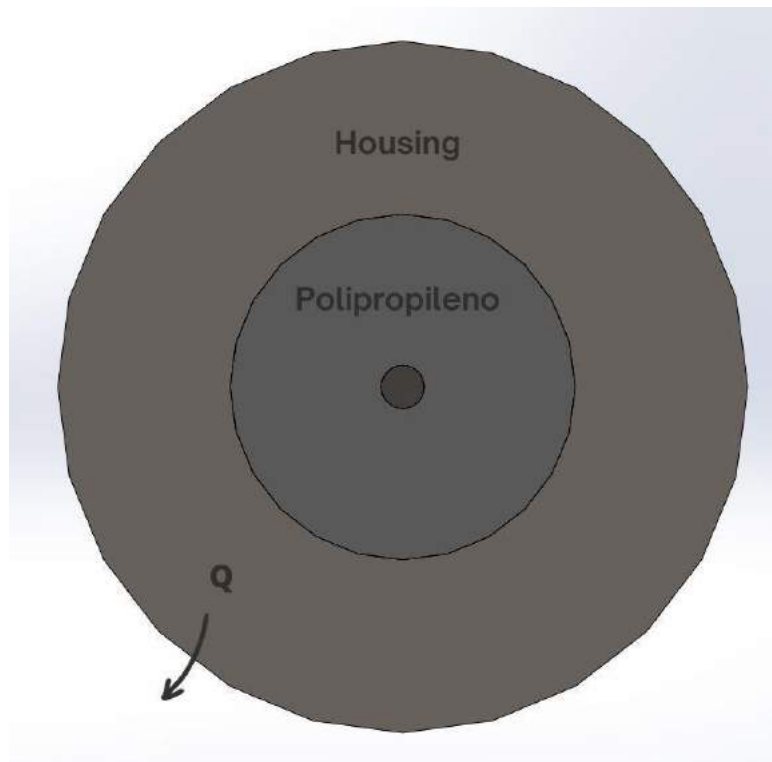


Figura 4-80: Transferencia de calor del electrodo hacia el ambiente.

Las ecuaciones utilizadas fueron las siguientes:

$$R_{conv} = \frac{1}{h A} \quad (4.22)$$

$$R_{cond} = \frac{\ln(r_{ext}/r_{int})}{2 \pi L k} \quad (4.23)$$

$$R_{eq} = R_{conv} + R_{cond} \quad (4.24)$$

$$Q = \frac{T_{ext} - T_{int}}{R_{eq}} \quad (4.25)$$

Los resultados finales obtenidos (ver [anexo A](#)) se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4-22: Resumen calentamiento.

Resumen cálculos sunchos		
Q perdido entrada inic	58.52091426	W
Q perdido entrada fin	25.10400749	W
Q perdido housing	410.8960606	W
Q calent. entrada inic	420	W
Q calent. entrada fin	280	W
Q calent. housing	2775.36	W
Ancho suncho ent inic.	0.035	m
Ancho suncho ent fin	0.025	m
Ancho suncho housing	0.110	m

En las siguientes imágenes se muestran los sunchos sobre cada una de las zonas. Se elige colocar la resistencia del housing del lado de la salida de material ya que es la zona crítica. En el otro extremo se coloca una aislación para evitar la pérdida de calor.

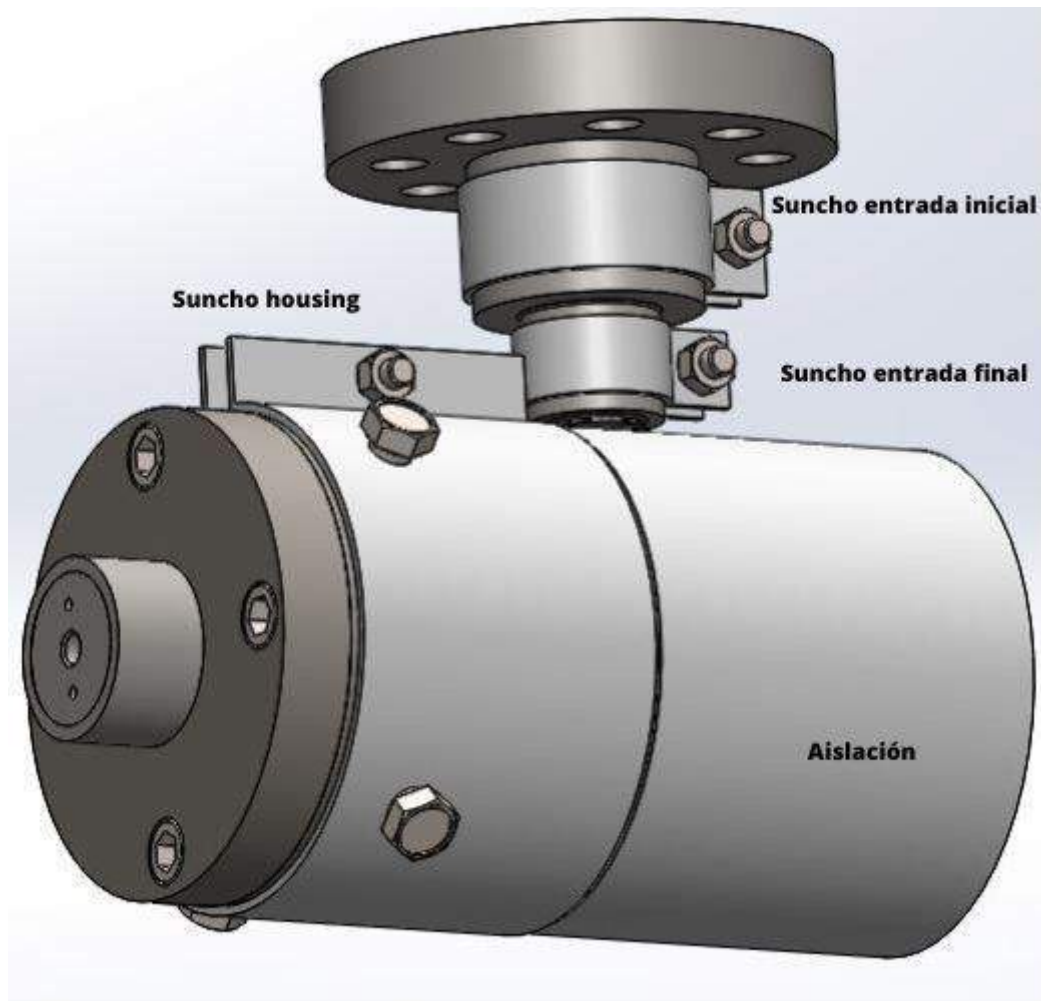


Figura 4-81: Calentamiento del cabezal.

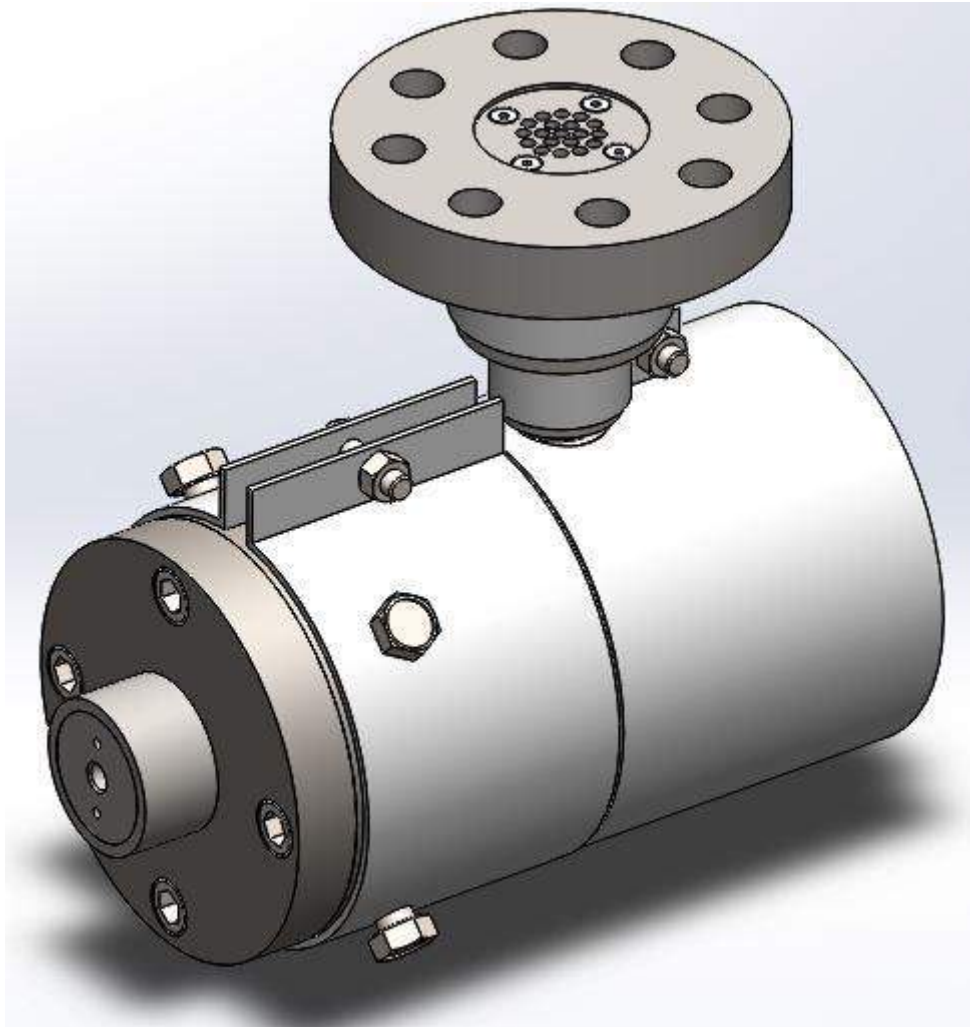


Figura 4-82: Calentamiento del cabezal.

Para poder adaptarse a las dimensiones mínimas y al aporte de energía necesario en cada caso, es necesario realizar una regulación en el circuito eléctrico. Teniendo en cuenta las siguientes ecuaciones que describen los fenómenos eléctricos, se nota que se puede regular la corriente, el voltaje o el valor de la resistencia:

$$V = R I \quad (4.26)$$

$$P = R I^2 \quad (4.27)$$

Como el valor de la resistencia es constante, porque depende del material con el que fue construida y de sus dimensiones, solo puede modificarse la corriente o la tensión de alimentación. La primera variación puede hacerse con un reóstato variable, de modo de adaptar el valor de esta segunda resistencia al calentamiento antes o durante

el funcionamiento, mientras que el segundo se logra al incluir una fuente con salida variable luego de la conexión a la red eléctrica doméstica.

4.5 Pasos previos a utilizar la máquina

1- Calentar el cabezal durante 15 min, según cálculos efectuados anteriormente, para que su temperatura se eleve hasta 230 °C.

2- Colocar el alma del electrodo dentro del cabezal y dejar salir, a partir de la boquilla de extrusión en la salida, 20 cm de alambre para poder conectarlo con el dispositivo del sistema tractor.

3- Una vez conectado el sistema tractor, comenzar con el proceso de extrusión (indicando inicio en la máquina extrusora), para poder comenzar a colocar el revestimiento en el alma del electrodo que se encuentra dentro del cabezal. El alma del electrodo comienza a ser traccionada mediante el sistema tractor a una velocidad constante

4- Una vez que el electrodo revestido llegue a la zona de las ruedas/rodillos tractoras, se desacopla la unión tractora para que ya comience a ser traccionado el electrodo únicamente.

A continuación, se muestra una figura esquemática del proceso de pre traccionado:

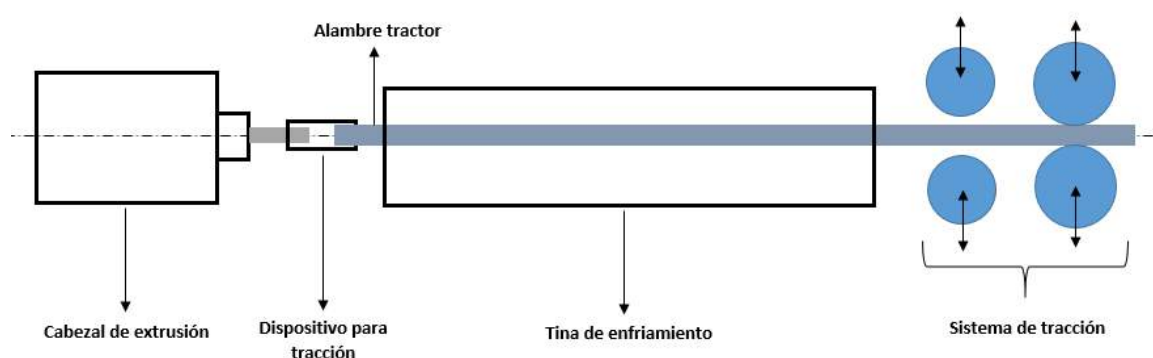


Figura 4-83: Pasos previos a utilizar la máquina.

Como se observa, el alma del electrodo que sale aproximadamente unos 15/20 cm del cabezal se conecta al dispositivo para tracción, el cual posee conectado en su otro extremo a un alambre tractor de diámetro 10 mm. Este último se dirige y conecta hacia el sistema de tracción, compuesto por 2 pares de rodillos o ruedas que realizan la tracción, pudiendo estos también regularse en altura para entrar o salir de funcionamiento y regular también la presión que ejerce sobre el alambre. En un

principio, al estar el alambre tractor colocado, se utiliza el par tractor trasero (se observa en la figura las ruedas de mayor diámetro), hasta que sea posible colocar el electrodo ya sólido proveniente del proceso de enfriamiento con el par tractor delantero.

Una vez que se puede colocar el electrodo a traccionar con el par delantero, se saca de funcionamiento el par trasero para que sólo sea traccionado el electrodo.

Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Dentro de las conclusiones, se remarca la importancia de una exhaustiva y correcta búsqueda de información previa para el desarrollo del diseño. Para un correcto diseño de máquinas o dispositivos que presenten un alto grado de importancia en factores y parámetros externos, es sumamente importante la búsqueda de información en libros, portales y referentes en el tema.

A partir de una metodología clara y establecida de desarrollo, partiendo de la bibliografía anteriormente citada (Ullman), fue posible clarificar los pasos para desarrollar el proyecto, utilizando herramientas muy importantes a la hora de la toma de decisiones y ponderación de las soluciones.

Poseer un proyecto ordenado y estructurado desde un principio, no solo mejora el orden del procedimiento si no que clarifica las decisiones que se van tomando a lo largo del mismo. Por lo tanto, los autores recomiendan seguir metodologías de desarrollo a partir de bibliografías y métodos utilizados en la actualidad, para utilizar la que mejor se adapte al proyecto en cuestión.

Por parte del diseño, es claramente visible la importancia de las herramientas computacionales para la comprobación de resultados y modelización, para de esta manera poder obtener una visión real del diseño, pudiendo comprobar la unión entre las partes con mayor certeza a partir de un ensamble.

Los resultados obtenidos se encontraron dentro de lo razonado durante el proceso de diseño, a partir de la búsqueda de procesos reales en donde se pudo tener conocimiento de diámetros y largos utilizados en la realidad, actividad recomendada por los autores durante una etapa de diseño.

5.2 Recomendaciones

Como recomendación para el desarrollo de cabezales de extrusión y dispositivos relacionados con la extrusión, podrían utilizarse herramientas específicas para extrusión como softwares comerciales, entre los cuales se pueden destacar: POLIFLOW, POLYCAD, EXTRUD, DIEPAK, DIEDES, PROWEX, DIEPLAST, entre otros.

Los mismos se basan en el desarrollo y cálculos específicos basados en M.E.F para diferentes formas de cabezales de extrusión según parámetros seteados.

Para este proyecto, no utilizamos dichos softwares debido a que los mismos son de carácter pago, ofrecido por empresas y organizaciones para el desarrollo industrial de cabezales y dispositivos.

Otros softwares como ANSYS, son muy útiles para obtener simulaciones de flujos de polímeros y procesos mucho más reales, con datos y parámetros con mayor certeza, a partir del seteo de las condiciones de frontera y estructurales.

Para este proyecto, el análisis de los parámetros de flujo escapa al objetivo y alcance del mismo, pudiendo establecerse como recomendación la simulación del mismo para estudios posteriores, a partir de las piezas y ensambles realizados en este proyecto.

Bibliografía

- [1] Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa*. DF, México: McGraw-Hill Interamericana.
- [10] Bracarense, A. Q. (2009). *Development of tubular coated electrodes of underwater wet welding*. Maracaibo: Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia. Obtenido de https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702009000200001&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- [11] Ferreira, M. M. (2020). *Fabricação de eletrodo arame tubular auto protegido composto por tubo de aço carbono e fluxo contendo Fe-Cr-Ni para a formação de aço inoxidável como metal de solda na soldagem subaquática de aço carbono A36*. Belo Horizonte: Universidad Federal de Mina Gerais. Obtenido de <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/36607>
- [12] Rosato, D. (1998). *Extruding Plastics*. Estados Unidos: Springer-Sience+Business media, b.v.
- [13] Marcilla., M. B. (2012). *Tecnología de Polímeros*. Alicante: Universidad de Alicante. Servicio de publicaciones.
- [14] Verdú, G. M. (2016). *Estudio, diseño, simulación y optimización de una matriz de extrusión de plástico*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- [2] Ullman, D. G. (2010). *The mechanical design process*. Nueva York: McGraw Hill Interamericana.
- [3] Michaeli, W. (1993). *Extrusion dies for plastics and rubber*. Nueva York: Hanser Publications.
- [4] Savgorodny, V. K. (1973). *Transformación de plásticos (Traducción de Luis Uralde)*. Barcelona: Gustavo Gili S.A.
- [5] Manrich, S. (2005). *Procesamiento de termoplásticos*. San Pablo: Artliber.
- [6] Brancarense, A. Q. (2021). *"Efeito da adição de PTFE no fluxo de arames tubulares sobre o arco elétrico em soldagem subaquática molhada "*. "Universidad de Mina Gerais". Obtenido de <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/37687>
- [7] Crawford, R. J. (1998). *Plastic Engineering*. Oxford: Butterworth-Heinemann.

- [8] Richard G. Budynas, & J Keith Nisbett. (2008). *Diseño de Ingeniería Mecánica de Shigley*. DF, México: McGraw-Hill Interamericana.
- [9] Mott, R. L. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. México: Pearson Education.

Anexo A: Memoria de cálculo

Ponderación de las soluciones

En las siguientes tablas se podrá observar el método de ponderación a partir de los 4 criterios establecidos, y su aplicación para cada solución creada.

Primeramente, se definen las importancias relativas de cada uno de los criterios en el total de la ponderación:

CRITERIO	FACILIDAD DE FABRICACIÓN	EFICIENCIA DE RECURSOS	FACILIDAD DE MONTAJE	EFICIENCIA DE ENFRIAMIENTO	$\Sigma+1$	PONDERACIÓN
FACILIDAD DE FABRICACIÓN		1	1	1	4	0.4
EFICIENCIA DE RECURSOS	0		1	0.5	2.5	0.25
FACILIDAD DE MONTAJE	0	0		0	1	0.1
EFICIENCIA DE ENFRIAMIENTO	0	0.5	1		2.5	0.25

Y una vez definido el peso relativo de cada criterio, se evalúa cada solución indicando en la casilla en valor 1 si la solución del renglón posee mayor ponderación en el criterio evaluado que la solución de la columna, 0,5 si ambos poseen la misma

ponderación y 0 si la solución de la columna posee mayor ponderación que el del renglón.

EVALUACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO FACILIDAD DE FABRICACIÓN							
	SOLUCIÓN 1	SOLUCIÓN 2	SOLUCIÓN 3	SOLUCIÓN 4	SOLUCIÓN 5	$\Sigma+1$	PONDERACIÓN
SOLUCIÓN 1		0	1	0	0	2	0.13
SOLUCIÓN 2	1		1	0	0	2.5	0.17
SOLUCIÓN 3	0	0		0	0	1.5	0.10
SOLUCIÓN 4	1	1	1		0	4	0.27
SOLUCIÓN 5	1	1	1	1		5	0.33
					SUMA	15	1.00
EVALUACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO EFICIENCIA DE RECURSOS							
	SOLUCIÓN 1	SOLUCIÓN 2	SOLUCIÓN 3	SOLUCIÓN 4	SOLUCIÓN 5	$\Sigma+1$	PONDERACIÓN
SOLUCIÓN 1		1	0.5	1	0.5	4	0.286
SOLUCIÓN 2	0		0.5	1	0	2.5	0.179
SOLUCIÓN 3	0.5	0.5		1	0	3	0.214
SOLUCIÓN 4	0	0	0		0	1	0.071
SOLUCIÓN 5	0.5	1	0.5	1		3.5	0.250
					SUMA	14	1.000
EVALUACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO FACILIDAD DE MONTAJE							
	SOLUCIÓN 1	SOLUCIÓN 2	SOLUCIÓN 3	SOLUCIÓN 4	SOLUCIÓN 5	$\Sigma+1$	PONDERACIÓN
SOLUCIÓN 1		0.5	0	0	0.5	1.5	0.1
SOLUCIÓN 2	0.5		0	0	0	1.5	0.1
SOLUCIÓN 3	1	1		0	0	3	0.2
SOLUCIÓN 4	1	1	1		0	4	0.27
SOLUCIÓN 5	1	1	1	1		5	0.33
					SUMA	15	1
EVALUACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO EFICIENCIA DE ENFRIAMIENTO (0.4 - Enfriamiento en sí, 0.4 - Eficiencia recursos utilizados, 0.2 - % humedad remanente en el electrodo luego del enfriamiento)							
	SOLUCIÓN 1	SOLUCIÓN 2	SOLUCIÓN 3	SOLUCIÓN 4	SOLUCIÓN 5	$\Sigma+1$	PONDERACIÓN
SOLUCIÓN 1		0.4	0.4	0.4	0.5	2.7	0.18
SOLUCIÓN 2	0.6		0.5	0.2	0.2	2.5	0.17
SOLUCIÓN 3	0.6	0.5		0.2	0.2	2.5	0.17
SOLUCIÓN 4	0.6	0.8	0.8		0.2	3.4	0.23
SOLUCIÓN 5	0.5	0.8	0.8	0.8		3.9	0.26
					SUMA	15	1.00

Posteriormente se evalúan los resultados realizando una ponderación global para poder seleccionar la solución que cumple con los criterios en mayor medida, a partir de la siguiente fórmula:

$$\sum_{m=1}^4 = (Ponderación\ solución\ m\ según\ criterio\ n) \times (ponderación\ global\ del\ criterio\ n)$$

CONCLUSIONES						
CRITERIO	FACILIDAD DE FABRICACIÓN	EFICIENCIA DE RECURSOS	EFICIENCIA DE ENFRIAMIENTO	FACILIDAD DE MONTAJE	Σ	PRIORIDAD (%)
SOLUCIÓN 1	0.053	0.071	0.045	0.010	0.180	17.976
SOLUCIÓN 2	0.067	0.045	0.042	0.010	0.163	16.298
SOLUCIÓN 3	0.040	0.054	0.042	0.020	0.155	15.524
SOLUCIÓN 4	0.107	0.018	0.057	0.027	0.208	20.786
SOLUCIÓN 5	0.133	0.063	0.065	0.033	0.294	29.417
SUMA					1.0	100.0

Diseño del cabezal

A continuación, se presentarán las fórmulas utilizadas para el diseño de los canales dentro del cabezal extrusor. En las mismas se debe tener en cuenta factores de viscosidad, conductividad del tramo, caída de presión, velocidad de cizalla y esfuerzo de corte máximo permisible, establecido en 0,15 Mpa.

Plato rompedor y mallas

Para el cálculo de las dimensiones del plato rompedor, se utilizan las siguientes fórmulas:

Fuente: Transformación de plásticos [4]

$$k = \frac{\pi n d_0^4}{128 b}$$

donde n y d_0 representan el n° y el diámetro de los orificios de la malla respectivamente, y b el espesor de la misma.

Además, se dimensiona la cantidad de agujeros y la caída de presión en cada malla y plato, a partir de la [fórmula de caudal](#).

Los resultados son los siguientes:

CÁLCULO CAÍDA DE PRESIÓN EN EL PLATO ROMPEDOR Y MALLAS								
Malla 1 N° 18			Malla 3 N° 100			Plato rompedor		
n	457	Cant ag	n	14041	Cant ag	n	17	Cant ag
Diámetro alambre	0.0004	m	Diámetro alambre	0.0001	m	Radio conducto	0.015	
d agujeros	0.001011	m	d agujeros	0.000154	m	d agujeros	0.005625	Diam ag
b (espesor)	0.0004	m	b (espesor)	0.0001	m	b	0.01	Espesor
K	0.0000000293	m3	K	0.0000000019	m3	K	0.0000000418	m3
Velocidad cizalla	100	s-1	Velocidad cizalla	100	s-1	Velocidad cizalla	100	s-1
Viscosidad	400	Pa. s	Viscosidad	400	Pa. s	Viscosidad	400	Pa. s
Delta P	73,885.1723	Pa	Delta P	1,116,701.7551	Pa	Delta P	51817.815	Pa
	0.0739	MPa		1.1167	MPa		0.05181781461	MPa
Area total	0.0007		Area total	0.0007				
Area ag	0.0004		Area ag	0.0003		Total Delta P	1.4962	Mpa
Razón areas	51.90%		Razón areas	37.00%				
Malla 2 N° 25			Malla 4 N° 18			Dimensiones generales plato rompedor		
n	872	Cant ag	n	457	Cant ag	Diámetro	0.063	m
Diámetro alambre	0.0004	m	Diámetro alambre	0.0004	m	Área plato	0.0031	m2
d agujeros	0.0007	m	d agujeros	0.001011	m	Fuerza s/ plato	978733.307	N
b (espesor)	0.0004	m	b (espesor)	0.0004	m	Tensión adm	800000000	Pa
K	0.0000000120	m3	K	0.0000000293	m3	Factor seg	0.7	-
Velocidad cizalla	100	s-1	Velocidad cizalla	100	s-1	e	0.0088	m
Viscosidad	400	Pa. s	Viscosidad	400	Pa. s		8.83051269	mm
Delta P	179,917.2333	Pa	Delta P	73,885.1723	Pa			
	0.1799	MPa		0.0739	MPa			
Area total	0.0007		Area total	0.0007				
Area ag	0.0003		Area ag	0.0004				
Razón areas	42.98%		Razón areas	51.90%				

Dimensionamiento canales de extrusión

Las fórmulas utilizadas corresponden con las siguientes:

Fuente: Extrusion dies for plastics and rubber [3]

$$V = \frac{K}{n} \Delta P$$

V: flujo volumétrico [m^3/s]

k: factor de conductividad del cabezal [m^3]

n: viscosidad [Pa.s]

ΔP : caída de presión [Pa]

Referencias:

K: conductividad del cabezal

γ : Velocidad de cizalla

τ : Tensión de corte (Tau)

→ **Fórmulas para canal de sección circular**

$$K = \frac{\pi R^4}{8L}$$

$$\gamma = \frac{4 V}{\pi R^3}$$

$$\tau = \frac{\Delta P}{2L} r$$

→ **Fórmulas para canal sección anular cónica**

$$K = \frac{\pi (R_0 \delta_2 - R_1 \delta_1)}{6Lm}$$

R_0, R_1 : radio medio a la entrada/salida

δ_2, δ_1 : anchura de la rendija en la salida/entrada

$$m = \frac{2,3(R_0 - R_1)^2}{(R_0 \delta_2 - R_1 \delta_1)^2} \lg \frac{R_0 \delta_2}{R_1 \delta_1} - \frac{(R_0 - R_1)(\delta_1 - \delta_2)}{(R_0 \delta_2 - R_1 \delta_1) \delta_1 \delta_2} - \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2 \delta_1^2 \delta_2^2},$$

$$\gamma = \frac{22,32 Q}{\pi (R_0 + R_1) (\delta_1 + \delta_2)^2}$$

$$\tau = \gamma n$$

(Modelizado como fluido Newtoniano)

→ **Fórmulas para canal sección anular recta**

$$K = \frac{2\pi R + H}{12 L} H^3$$

Donde H es la diferencia entre los radios

$$\gamma = \frac{6 V}{\pi D H^2}$$

$$\tau = \frac{\Delta P}{L} x$$

Partiendo de las fórmulas anteriormente expresadas, es posible calcular, a partir de la propuesta de un radio y un largo determinado, la conductividad del tramo K, la velocidad de cizalla en el tramo, la caída de presión y los esfuerzos generados en el tramo, los cuales deben ser menores a 0,15 Mpa.

Por su parte, la viscosidad para cada tramo, en función de la velocidad de corte calculada, es detallada a partir de la gráfica para polipropileno [7].

Analysis of polymer melt flow

353

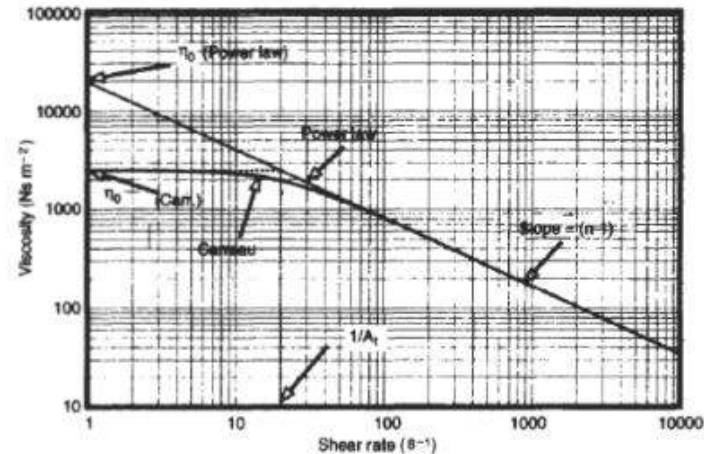


Fig. 5.7 Comparison of Models for Flow Behaviour

Analysis of polymer melt flow

345

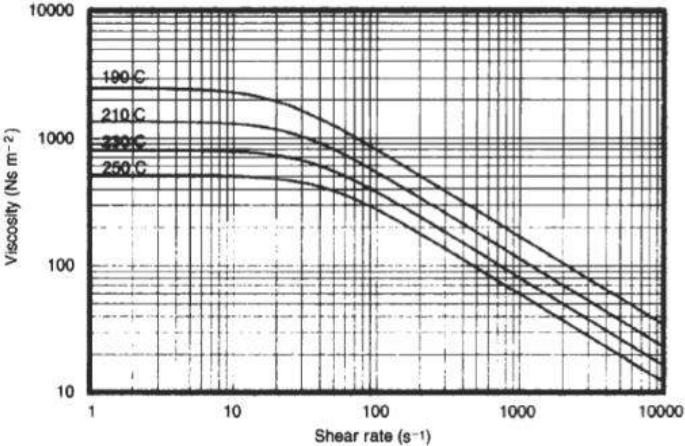
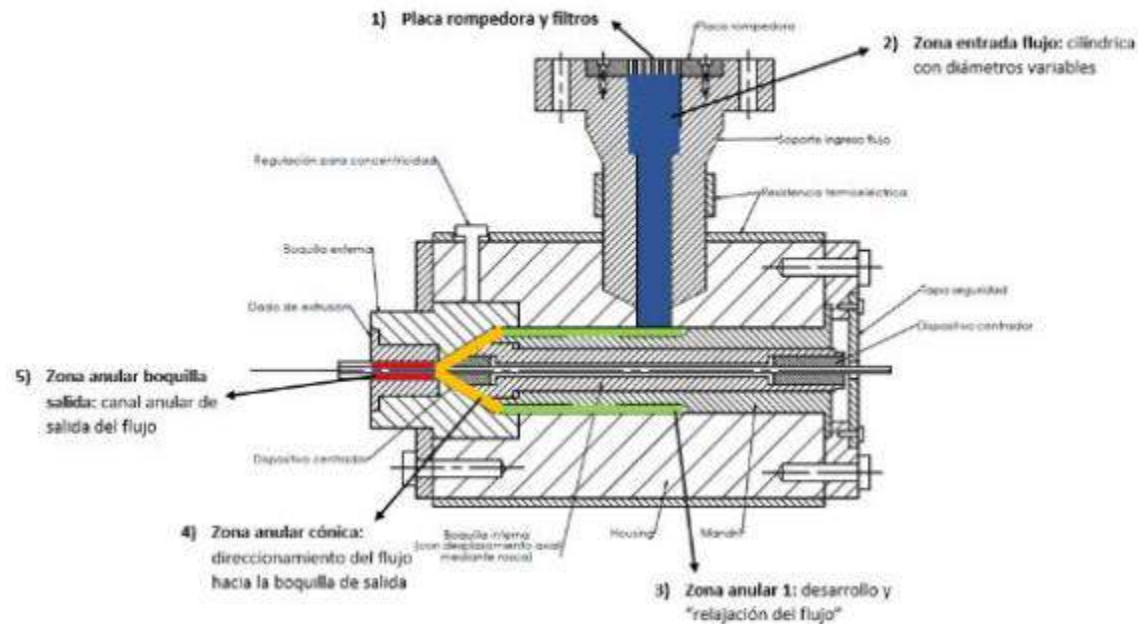


Fig. 5.2 Viscosity curves for polypropylene

Los resultados obtenidos son los siguientes:

DATOS			
Densidad pp fundido	770 kg/m ³		
Producción deseada	15 Kg/h	0.004166666667 Kg/s	
Flujo volumétrico	0.00000541125541 m ³ /s		
Tau critico	0.15 Mpa	1.529574 Kg/cm ²	



CÁLCULOS PARÁMETROS Y DIMENSIONES		
1) Placa rompedora y filtros		
Delta P filtro total	1.496207148	Mpa

2) Tramo entrada flujo		
Radio mayor		
r	0.015	m
L	0.03	m
K	0.000000662679700	m ³
Velocidad cizalla	2.041429445	s ⁻¹
Viscosidad	800	pa.s
Delta P	6532.574223	Pa
	0.006532574223	Mpa
Tau [MPa]	0.001633143556	Mpa
Cono		
r0	0.004	m
R0	0.015	m
L	0.04	m
K	0.000000021135299	m ³
Velocidad cizalla	18.524621	s ⁻¹
Viscosidad	800	pa.s
Delta P	204823.421	Pa
	0.204823421	MPa
Tau [MPa]	0.03840439143	Mpa
Tramo largo		
r	0.004	m
L	0.07	m
K	0.000000001436156	m ³
Velocidad cizalla	107.6535059	s ⁻¹
Viscosidad	700	pa.s
Delta P	2637510.894	Pa
	2.637510894	Mpa
Tau [MPa]	0.07535745412	Mpa

3) Tramo anular recto

Zona anular 1		
r0	0.03	m
R0	0.04	m
H	0.01	m
L	0.07	m
K	0.000000311104062	m3
Velocidad cizalla	1.291842071	s-1
Viscosidad	800	pa.s
Delta P	13914.97204	Pa
	0.01391497204	Mpa
Tau [MPa]	0.0009939265746	Mpa

4) Tramo anular cónico

Sección anular cónica		Sección anular cónica - Canal reducido		Observaciones
Ro	0.035 m	Ro	0.035 m	
R1	0.006 m	R1	0.006 m	
d1	0.01 m	d1	0.002 m	Ancho de canal en la entrada
d2	0.01 m	d2	0.002 m	Ancho de canal en la salida
m	17616.08626	m	440402.1565	
L	0.05 m	L	0.05 m	
k	0.000000172392031 m3	k	0.0000000013791362 m3	
Velocidad cizalla	2.344220733 s-1	Velocidad cizalla	58.60551832 s-1	
Viscosidad	800 pa.s	Viscosidad	600 pa.s	
Delta P	25111.39459 Pa	Delta P	2354193.243 Pa	
	0.02511139459 Mpa		2.354193243 Mpa	
Tau [Mpa]	0.001875376586 Mpa	Tau [Mpa]	0.03516331099 Mpa	

5) Tramo Boquilla		
Zona boquilla		
r0	0.005	m
R0	0.01	m
H	0.005	m
L	0.05	m
K	.0000000141316360	m3
Velocidad cizalla	20.66947313	s-1
Viscosidad	700	pa.s
Delta P	268042.4809	Pa
	0.2680424809	Mpa
Tau [MPa]	0.01340212405	Mpa

Parámetros del tornillo de extrusión

Se calculan los parámetros de diseño de un tornillo de extrusión convencional con diámetro y paso igual a 30 mm. Las fórmulas se presentan según indica Savgorodny [4].

Definición de parámetros del tornillo			Fórmula
Diámetro	30	mm	
Paso	30	mm	
Angulo de la hélice	17.05	°	$\varphi = \tan^{-1} \frac{t}{\pi D}$
	0.308050613		
Relación L/D	25	:1	
Largo tornillo	750	mm	
Espesor filete	3	mm	$e = 0,1xD$
Holgura tornillo/cilindro	0.06	mm	$\delta = 0,002xD$
Relación de compresión	3		
Prof zona alimentación	6	mm	$h_{\max \text{ zona alimentación}} = 0,2xD$
Prof zona dosificación	2	mm	$R_{\text{compresión}} = \frac{h_{\text{zona alimentación}}}{h_{\text{zona dosificación}}} = 3$
Cant filetes	25		$\text{Cant Filetes} = \frac{L}{D}$
Vel cizalla promedio	111	s-1	
RPM promedio	2.355493158	rps	
	141.3205895	RPM	
Viscosidad promedio en tornillo	400	Pa.s	
Viscosidad promedio en cabezal	700	Pa.s	
m	1	(numero de canales del tornillo)	

Alpha (Flujo de arrastre Qd)	2310.753627	mm3	$\alpha = \frac{\pi m D h \left(\frac{t}{m} - e \right) \cos^2 \varphi}{2}$
	0.000002310753627	m3	
Beta	0.006634291493	mm3	$\beta = \frac{m h^2 \left(\frac{t}{m} - e \right) \sin \varphi \cdot \cos \varphi}{12L}$
	0.000000000000663	m3	
Gamma	0.0004522039357	mm3	$\gamma = \frac{\pi^2 D^2 h^3 \tan \varphi}{10eL}$
	0.000000000000452204	m3	

Cálculos de caudales de extrusión

Para el cálculo de los caudales de extrusión y la comparación entre el caudal generado desde el tornillo y el que fluye por el cabezal de extrusión, se debe calcular la conductividad global del cabezal K.

VALORES DE K [m3]		1/K	
K FILTRO	0.00000004177139041	23939830.35	[1/m3]
K1	0.0000006626797004	1509024.646	[1/m3]
K2	0.00000002113529941	47314210.24	[1/m3]
K3	0.000000001436156642	696302876	[1/m3]
K4	0.0000003111040622	3214358.542	[1/m3]
K5	0.0000001723920315	5800732.151	[1/m3]
K6	0.00000001413163606	70763214.96	[1/m3]
KTOTAL		0.000000001178072425	[m3]

Caudal teórico de prod	0.000005411255411	m3/s	
Q calculado desde el tornillo (Q1)	0.0003245429821	[m3/min]	
	0.000005409049702	[m3/seg]	$Q = \left(\frac{aK}{K + \beta + \gamma} \right) \cdot n$
			Tiene en cuenta el flujo generado desde el tornillo
CAIDA DE PRESION TOTAL	3207753.551	Pa	
	3.207753551	Mpa	
Q calculado para el cabezal (Q2)	0.000005398522862	[m3/seg]	$\dot{V} = \frac{K}{\eta} \Delta p$
			Tiene en cuenta la caída de presión en el cabezal
Diferencia entre Q1 y Q2	0.1949948103	%	
	194994.8103	[cm3/seg]	
Diferencia entre Qteorico y Q1	0.04076151482	%	
	40761.51482	[cm3/seg]	
Diferencia entre Qteorico y Q2	0.2352975071	%	
	235297.5071	[cm3/seg]	

Comparación caudales con reducción de sección en tramo cónico anular

Se calcula, al igual que en cálculo anterior, la diferencia entre los caudales, teniendo ahora una reducción en la sección del tramo anular cónico, realizando el cálculo con una sección de 2 mm.

K5 REDUCIDO	0.000000001379136252	725091518.9	[1/m3]
KTOTAL - CON CANAL CÓNICO REDUCIDO		0.0000000006377001843	[m3]

Caudal teórico de prod	0.000005411255411	m3/s
Q calculado desde el tornillo con tramo cónico reducido (Q1*)	0.0003228384169	[m3/min]
	0.000005380640281	[m3/seg]
CAIDA DE PRESION TOTAL - SECCIÓN REDUCIDA	5536835.4	Pa
	5.5368354	Mpa
Q calculado para el cabezal (Q2*) - con sección cónica reducida	0.000005044058507	[m3/seg]
Diferencia entre Q1* y Q2*	6.672836439	%
	6672836.439	[cm3/seg]
Diferencia entre Qteorico y Q1*	0.5657676009	%
	565767.6009	[cm3/seg]
Diferencia entre Qteorico y Q2*	6.785798786	%
	6785798.786	[cm3/seg]

Cálculo presiones del sistema

Se calcula la presión máxima del sistema a partir de la fórmula proporcionada por Savgorodny [4]. La misma será utilizada como presión de diseño de los componentes.

Pmax en sistema	313973784.5	Pa	$P_{max} = \frac{6 \times \pi \times D \times L \times N \times \mu}{h_{diz}^2 \times \tan \varphi} \text{ [Mpa]}$
	313.9737845	Mpa	

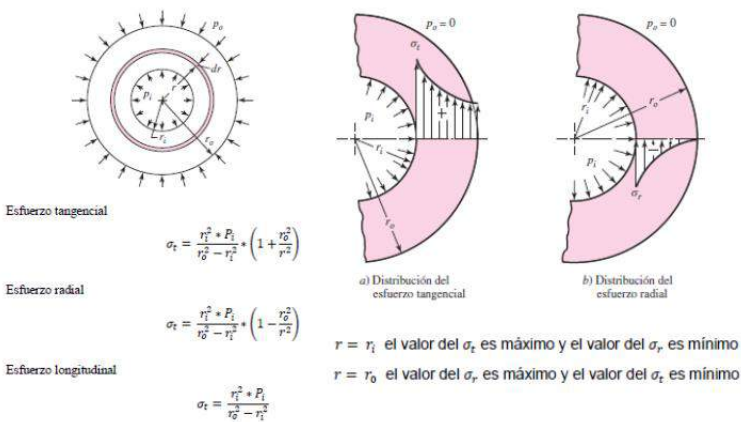
Se calcula también la presión de operación en el cabezal, a partir de la fórmula que se expresa en [7].

P operación	15544093.72	pa	$P_{op} = \frac{2 \times \pi \times \mu \times D^2 \times \eta \times h \times \sin \varphi \times \cos \varphi}{\left(\frac{R^4}{2 \times L_d}\right) + \left(\frac{D \times h^3 \times \sin^2 \varphi}{3 \times L}\right)}$
	15.54409372	Mpa	
viscosidad op	800	pa.s	
R	0.0025	m	
Ld	0.05	m	
D	0.03	m	
h	0.002	m	
L	0.75	m	

A partir de la fórmula y la caída de presión anteriormente calculada, se asegura que la presión de extrusión en el cabezal es mayor a 10 Mpa, condición necesaria para la extrusión.

Cálculo espesor del cabezal

Según lo expresado por Shigley [8], se calcula el espesor del cabezal de extrusión a partir de las tensiones tangenciales, longitudinales y radiales que son ejercidas por la presión de diseño, y a partir del criterio de Von Misses para la corroboración de que las tensiones generadas para un espesor propuesto se encuentran en buenas condiciones.



ESPESOR DEL CABEZAL		
ri	40	mm
e propuesto	30	mm
ro	70	mm
Pi	313.9737845	Mpa
ESFUERZO TANGENCIAL MAXIMO (r=ri)	618.433212	Mpa
ESFUERZO RADIAL MAXIMO (r=ri)	-313.9737845	Mpa
ESFUERZO LONGITUDINAL	152.2297137	Mpa
primer termino	869382.8071	
segundo termino	217345.7018	
tercer termino	217345.7018	
SIGMA VON MISSES	807.4881456	Mpa
Sigma fluencia Acero AISI 420 - 1.2083	1300	Mpa
Limite superior	910	Mpa
Factor seguridad	0.7	

Cálculo de bulones para brida de unión cilindro - cabezal

Se realiza el cálculo para los bulones de unión entre el cilindro y el tramo de ingreso de la mezcla.

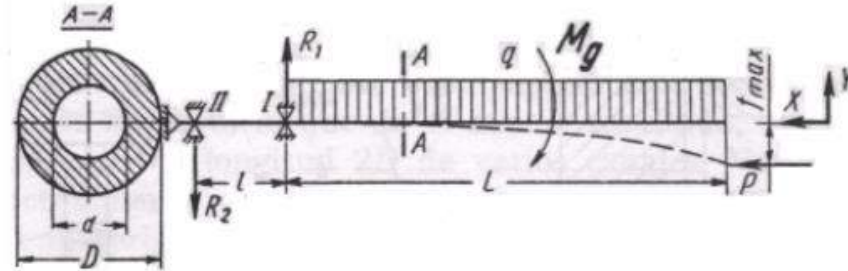
Primeramente, se realiza el cálculo del área donde se ejerce la presión al final del cilindro donde se encuentra el tornillo (previo al plato rompedor).

F = Superficie transversal del husillo A – A

$$F = \frac{\pi \times D^2}{4} (1 - u^2)$$

$$u = \frac{da}{dd}$$

u = Relación de diametro entre los husillos
 da = Diametro de alimentación
 dd = Diametro de dosificación



SUPERFICIE DONDE SE GENERA EL ESFUERZO DE PRESION DE 313 Mpa (P_{MAX})

Luego, la fuerza máxima ejercida sobre la superficie calculada:

F max	115563.782 N
$F = A \times P_{max} [\text{Newton}]$	
A = superficie de la sección transversal del husillo, sobre la que ejerce presión el material (m ²)	
P_{max} = Presión específica del material en la parte delantera del cilindro ($\frac{N}{m^2}$)	

Luego, proponiendo una cantidad de 8 bulones se calcula la fuerza que se ejerce sobre cada uno

cantidad bulones	8
Ft	14445.47274 N

Posteriormente, se calcula el esfuerzo medio sobre cada bulón:

$$F_m = F_i + \frac{CF_t}{2}$$

Donde:

F_i = Tencion inicial

C = Factor elastico por carga

F_t = Fuerza tangencial [N]

Fm	44419.82869	N
Fi	43336.41823	N
C	0.15	

Además, las fuerzas alternas en el tornillo resultan:

$$F_b = \frac{CF_t}{2}$$

Fb	1083.410456	N
----	-------------	---

Luego, se realiza el cálculo de la tensión de fatiga actuante, a partir de la aplicación de un coeficiente de 0,5 de la tensión admisible del tornillo

Su	830	Mpa
Sn	415	Mpa
	415000000	Pa

donde Su es la tensión admisible del tornillo y Sn la tensión de fatiga, considerando todos los factores de la ecuación de fatiga iguales a 1.

$$\sigma_{adm} = S_e = S_e K_a K_b K_c K_d K_f$$

En donde:

S_e = Limite de resistencia a la fatiga

S_e' = Limite de resistencia a la fatiga en el material

K_a = Factor de modificación por acabado

K_b = Factor de modificación por tamaño

K_c = Factor de modificación por carga

K_d = Factor de modificación por temperatura

Por su parte, el factor límite de fatiga surge de afectar a la tensión de fatiga por un coeficiente. En este caso, se utiliza 0,85 del valor calculado:

Snf	352.75	Mpa
	352750000	Pa

Luego, a partir de la ecuación de rigidez de la junta, expresada en Shigley [8], se despeja el área de los bulones y a partir de esto, el diámetro de los mismos

$$\frac{1}{F_s} = \frac{\sigma_m}{S_n} + \frac{K_t \sigma_a}{S_{nf}}$$

Fs	2	
1/Fs	0.5	
Kt	1.4	
1er termino	0.0001070357318	
2do termino	0.000004299857231	
A	0.000222671178	m2

INT RAIZ	0.0002835137493	
D	0.01683786653	m
	16.83786653	mm

Cálculo de tornillos para boquilla interior y tapas laterales

Se realiza el cálculo para los tornillos que soportan la boquilla interior y, del mismo modo, los resultados se utilizan para los tornillos que soportan las tapas laterales.

Los pasos a seguir son basados en ejemplos y tablas expresadas en Mott [9]

CARGA DEL TORNILLO	300 Mpa
SE PROPONE UN TORNILLO:	
GRADO	9.8
RESISTENCIA PRUEBA	650 Mpa
SE PROPONE QUE SOPORTA EL 75% DE LA RESIST PRUEBA	
SIGMA a	487.5 Mpa
PROPONRIENDO UN TORNILLO DE 16 mm	
AREA DE ESFUERZO TENSION	157 mm ²
ESFUERZO QUE SOPORTA	47100 N
ENTONCES	
AREA NECESARIA DE ESFUERZO	96.61538462 mm ²
CON BULONES M14 y GRADO 9.8 SERÍA SUFICIENTE	
paso = 1.5	

TABLA 18-3 Grados métricos de aceros para pernos

Grado	Tamaño del perno	Resistencia a la tensión (MPa)	Resistencia de fluencia (MPa)	Resistencia de prueba (MPa)
4.6	M5-M36	400	240	225
4.8	M1.6-M16	420	340 ^a	310
5.8	M5-M24	520	415 ^a	380
8.8	M17-M36	830	660	600
9.8	M1.6-M16	900	720 ^a	650
10.9	M6-M36	1040	940	830
12.9	M1.6-M36	1220	1100	970

TABLA 18-5 Dimensiones de roscas métricas

Diámetro mayor básico (mm)	Roscas gruesas		Roscas finas	
	Paso (mm)	Área de esfuerzo de tensión (mm ²)	Paso (mm)	Área de esfuerzo de tensión (mm ²)
1	0.25	0.460		
1.6	0.35	1.27	0.20	1.57
2	0.4	2.07	0.25	2.45
2.5	0.45	3.39	0.35	3.70
3	0.5	5.03	0.35	5.61
4	0.7	8.78	0.5	9.79
5	0.8	14.2	0.5	16.1
6	1	20.1	0.75	22.0
8	1.25	36.6	1	39.2
10	1.5	58.0	1.25	61.2
12	1.75	84.3	1.25	92.1
16	2	157	1.5	167
20	2.5	245	1.5	272
24	3	353	2	384
30	3.5	561	2	621
36	4	817	3	865
42	4.5	1121		
48	5	1473		

Cálculo del sistema de enfriamiento

Los cálculos realizados corresponden a un enfriamiento de tipo transitorio. Se calculó, para una tina de agua a temperatura ambiente, aire a presión a temperatura ambiente y spray de agua + aire, el coeficiente convectivo, el número de Biot y el número de Fourier para poder utilizar las ecuaciones correspondientes al enfriamiento en estado transitorio planteadas en Cengel [1].

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en el cálculo de enfriamiento del electrodo para un tiempo de 60 segundos, estimando así la longitud de la tina de enfriamiento para poder manipular el electrodo.

Una temperatura coherente para la manipulación del electrodo se encuentra por debajo de 80°C.

Tina de enfriamiento

ENFRIAMIENTO CON TINA DE AGUA			
Calculo coef convección			Observaciones
Vel	0.05	m/s	
D	0.01	m	
v	0.00001004	m ² /s	Tabla A-9 [1]
Re	498.0079681	-	
Pr	7.01	-	Tabla A-9 [1]
Nu	23.61776633	-	
k	0.598	W/mK	Tabla A-9 [1]
h	1412.342427	W/m ² K	
Cálculo n° Biot			
k pp	0.25	W/mK	
V	0.00007853981634	m ³	
As	0.03141592654	m ²	
Lc	0.005	m	
Bi	28.24684853	-	
Cálculo n° Fourier			
Densidad pp	900	kg/m ³	
Cp pp	1930	J/KgC	
Alpha	0.0000001439263097	m ² /s	
t	60	s	
Tau	0.3454231434	-	> 0.2 Heiser o a. un término
T ad en elcentro			
landa	2.3		
A1	1.593		
Theta	0.2562326656		
Ti	230	°C	
T inf	20	°C	
Theta (0, tau)	73.80885977	°C	
Cálculo fuera del centro			
r0	0.005	m	Diámetro externo
r1	0.0025	m	Diám interior pp-alambre
r1/r0	0.5	-	
1/Bi	0.03540217942	-	
Theta/Theta 0 (r1,tau)	0.7		
Theta (r1,tau)	57.66620184	°C	
r2	0.005	m	Diámetro exterior
r2/r0	1		
Theta/Theta 0 (r2,tau)	0.025		
T(r2,tau)	21.34522149	°C	
Velocidad avance electrodo			
	0.05	m/s	
Distancia recorrida hasta el punto de enfriamiento calculado			
	3	m	

Aire a presión

ENFRIAMIENTO CON AIRE A PRESIÓN			
Calculo coef convección			Observaciones
Vel	20	m/s	
D	0.01	m	
v	0.00001516	m2/s	Tabla A-15 [1]
Re	13192.61214	-	
Pr	0.7309	-	Tabla A-15 [1]
Nu	61.1703634	-	
k	0.02514	W/mK	Tabla A-15 [1]
h	153.7822936	W/m2K	
Cálculo n° Biot			
k pp	0.25	W/mK	
V	0.00007853981634	m3	
As	0.03141592654	m2	
Lc	0.005	m	
Bi	3.075645872	-	
Cálculo n° Fourier			
Densidad pp	900	kg/m3	
Cp pp	1930	J/KgC	
Alpha	0.0000001439263097	m2/s	
t	60	s	
Tau	0.3454231434	-	> 0.2 Heiser o a. un término
T ad en elcentro			
landa	1.7887		
A1	1.4191		
Theta	0.4699446251		
Ti	230	°C	
T inf	25	°C	
Theta (0, tau)	121.3386481	°C	
Cálculo fuera del centro			
r0	0.005	m	Diámetro externo
r1	0.0025	m	Diám interior pp-alambre
r1/r0	0.5	-	
1/Bi	0.3251349608	-	
Theta/Theta 0 (r1,tau)	0.75		
Theta (r1,tau)	97.25398611	°C	
r2	0.005	m	Diámetro exterior
r2/r0	1		
Theta/Theta 0 (r2,tau)	0.25		
Theta (r2,tau)	49.08466204	°C	
Velocidad avance electrodo			
0.05			m/s
Distancia recorrida hasta el punto de enfriamiento calculado			
3			m

Spray (aire + agua)

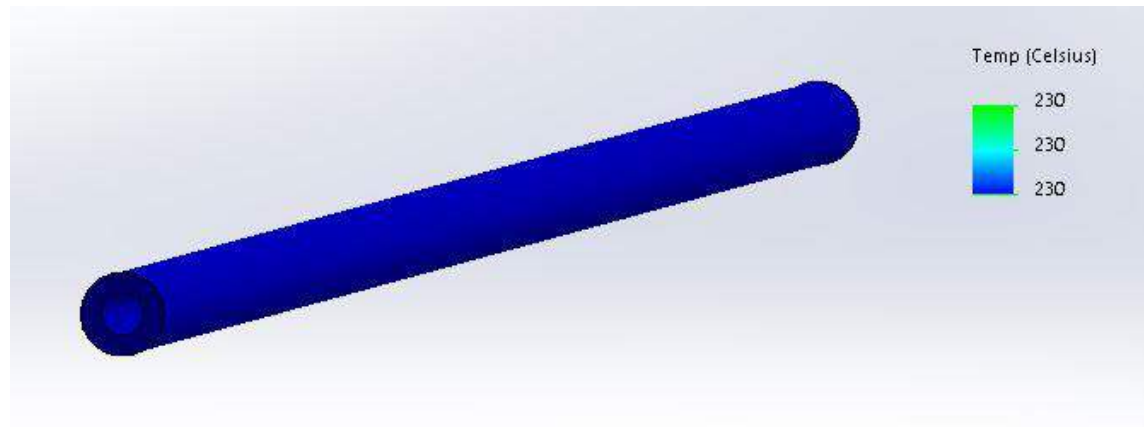
ENFRIAMIENTO CON SPRAY (AIRE + AGUA)			
Cálculo coef convección			Observaciones
Vel	0.5	m/s	
D	0.01	m	
v	0.000001004	m ² /s	Tabla A-9 [1]
Re	4980.079681	-	
Pr	7.01	-	Tabla A-9 [1]
Nu	71.17956723	-	
k	0.598	W/mK	Tabla A-9 [1]
h	4256.53812	W/m ² K	
Cálculo n° Biot			
k pp	0.25	W/mK	
V	0.00007853981634	m ³	
As	0.03141592654	m ²	Área impactada por el spray
Lc	0.005	m	
Bi	85.1307624	-	
Cálculo n° Fourier			
Densidad pp	900	kg/m ³	
Cp pp	1930	J/KgC	
Alpha	0.0000001439263097	m ² /s	
t	60	s	
Tau	0.3454231434	-	> 0.2 Heiser o a. un término
T ad en el centro			
landa	2.37		
A1	1.601		
Theta	0.2300223456		
Ti	230	°C	
T inf	25	°C	
Theta (0, tau)	72.15458085	°C	
Cálculo fuera del centro			
r0	0.005	m	Diámetro externo
r1	0.0025	m	Diám interior pp-alambre
r1/r0	0.5	-	
1/Bi	0.01174663508	-	
Theta/Theta 0 (r1,tau)	0.75		
Theta (r1,tau)	60.36593564	°C	
r2	0.005	m	Diámetro exterior
r2/r0	1		
Theta/Theta 0 (r2,tau)	0.025		
T(r2,tau)	26.17886452	°C	
Velocidad avance electrodo			
Velocidad avance electrodo	0.05	m/s	
Distancia recorrida hasta el punto de enfriamiento calculado			
Distancia recorrida hasta el punto de enfriamiento calculado	3	m	

Cálculo de la distancia del soporte

ENFRIAMIENTO CON TINA DE AGUA - SOPORTE		
CALCULO NUMERO DE BIOT		
Calculo coef convección		
Vel	0.05	m/s
D	0.01	m
v	0.000001004	m ² /s
Re	498.0079681	-
Pr	7.01	-
Nu	23.61776633	-
k	0.598	W/mK
h	1412.342427	W/m ² K
Cálculo n° Biot		
k pp	0.25	W/mK
V	0.00007853981634	m ³
As	0.03141592654	m ²
Lc	0.005	m
Bi	28.24684853	-
Cálculo n° Fourier		
Densidad pp	900	kg/m ³
Cp pp	1930	J/KgC
Alpha	0.0000001439263097	m ² /s
t	40	s
Tau	0.2302820956	-
T ad en elcentro		
landa	2.3	
A1	1.593	
Theta	0.4711525959	
Ti	230	°C
T inf	20	°C
Theta (0, tau)	118.9420451	°C
Cálculo fuera del centro		
r0	0.005	m
r1	0.0025	m
r1/r0	0.5	-
1/Bi	0.03540217942	-
Theta/Theta 0 (r1,tau)	0.7	
Theta (r1,tau)	89.2594316	°C
r2	0.005	m
r2/r0	1	
Theta/Theta 0 (r2,tau)	0.025	
T(r2,tau)	22.47355113	°C
Velocidad avance electrodo	0.05	m/s
Distancia recorrida hasta el soporte	2	m

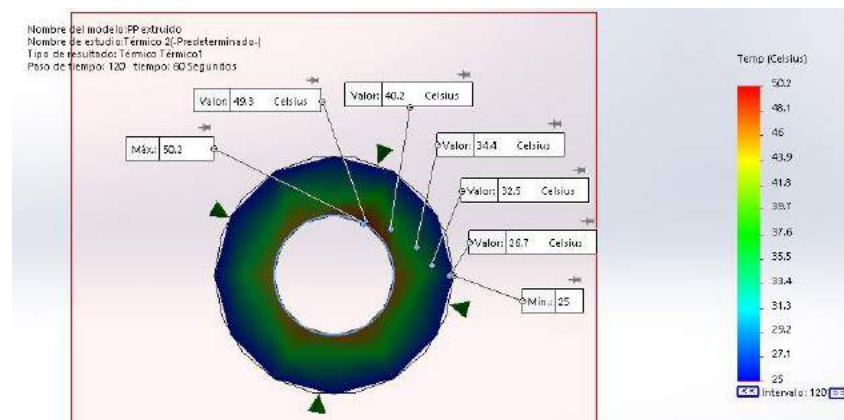
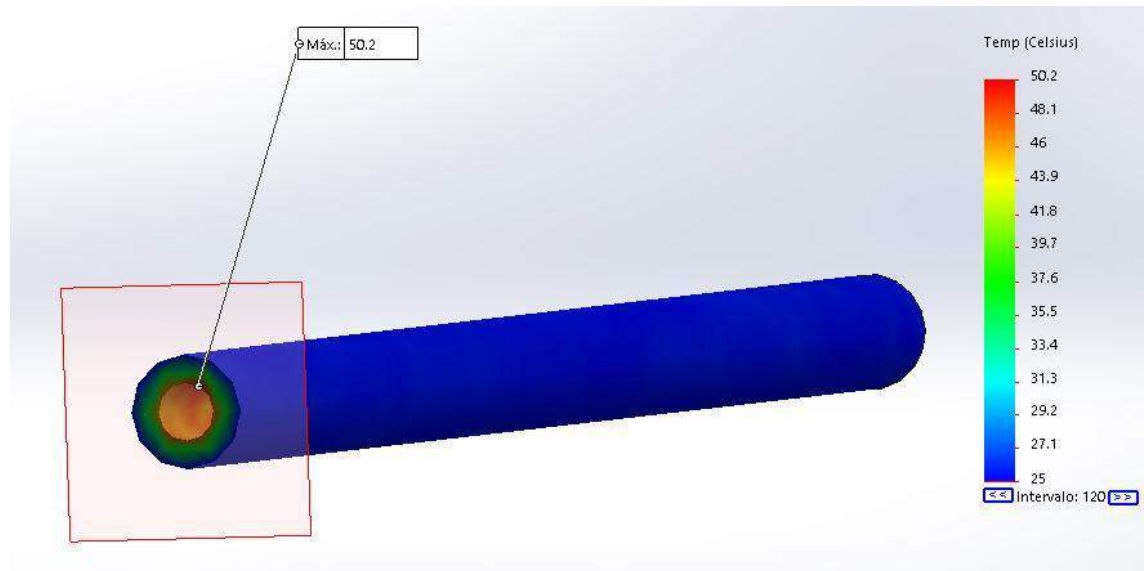
Simulaciones efectuadas para comprobación de cálculos de enfriamiento

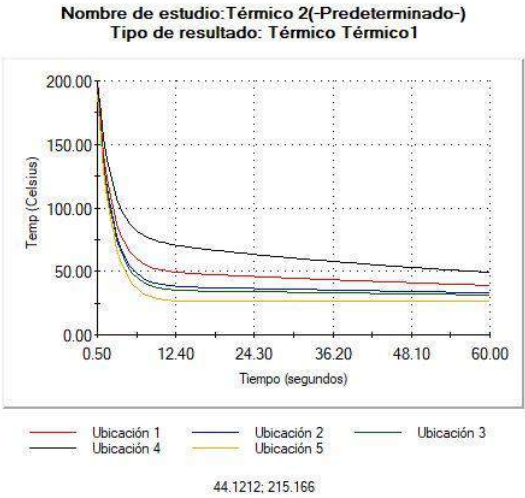
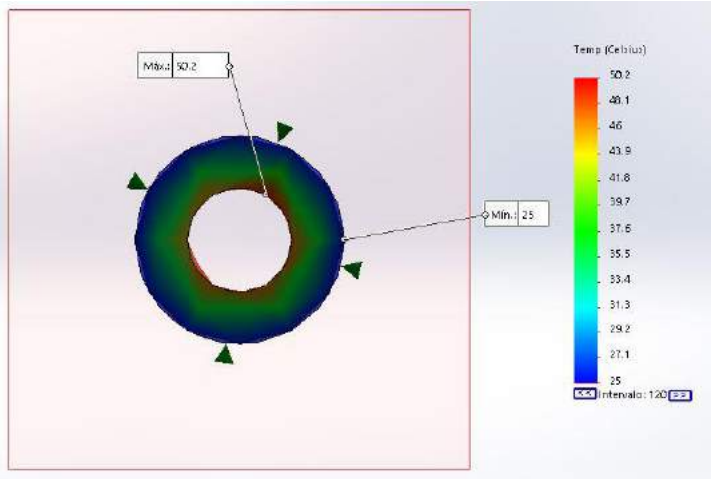
Se preparó una simulación en donde se diseñó el electrodo a la salida del cabezal, simulando el revestimiento a una temperatura homogénea de 230°C:



Posteriormente, se aplicó un efecto de enfriamiento mediante convección forzada utilizando un coeficiente convectivo de 1400 W/m²K, para simular el enfriamiento mediante tina de agua.

Los resultados obtenidos en el perfil de revestimiento son prácticamente similares a los encontrados mediante cálculos en régimen transitorio, para un tiempo de enfriamiento de 60 segundos:





Cálculo del calentamiento del agua

Se calcula el calentamiento del agua a partir del ingreso del electrodo a 230°C, el cual proviene del cabezal extrusor.

Este cálculo se realiza para conocer si es necesario un enfriamiento del agua durante el proceso de enfriamiento.

Además, se calcula también el calentamiento del agua a partir del agitador utilizado para agitar el agua y que la misma se encuentre en movimiento para asegurar que las capas de agua en contacto con el electrodo pueda moverse y que entren en contacto nuevas capas de agua más fría constantemente. De esta manera, se mantiene la capacidad de enfriamiento durante todo el proceso.

Cálculo calentamiento del agua			Observaciones
V pp	0.004166666667	kg/s	
Q máx	1688.75	W	
Bi ² xTau	183.7385037	-	
Q/Qmáx	0.825	-	
Q	1393.21875	W	
V agua	0.07	m ³	
m agua	67.5	kg	
T agua	25	°C	
cp agua	4182	J/kgK	Tabla A-9 [1]
t extrusión	200	s	
Largo extruido	10	m	
Q	278643.75	J	
T final	25.9871008	°C	
Calculo calentamiento del agua con la agitador			
Agitador	Voyager Nano Catálogo Video funcionamiento		
Potencia	2.8	W	
Q total	279203.75	J	
T final	25.98908461	°C	

Como se puede observar, el calentamiento del agua de la tina durante el proceso es muy poco, por lo que se considera que no es necesario el enfriamiento mediante un equipo externo.

Energía necesaria para mantener la temperatura en 230 °C

Cálculo de la energía necesaria para calentar el housing y tramo de entrada del cabezal, a partir del calor que pierde la mezcla de extrusión (que llega al cabezal con 230°C) al pasar por los canales, para así poder mantener la temperatura del fluido siempre constante durante su paso por los tramos.

ENERGÍA NECESARIA PARA MANTENER LA TEMPERATURA EN 230 °C									
Q perdido entrada inicial					Suncho entrada inicial			Observaciones	
T plástico	230	°C			Potencia Res	0.7	W/cm2	Suncho cerámico	
T exterior	20	°C			Cant cm2 cubiertos	83.601	cm2		
k acero	15.1	W/mK	h aire. Conv + rad	25	W/m2°C	Cant m2 cubiertos	0.008	m2	
Radio ext	0.0375	m			% Area cubierto	70.96%	-		
Radio int	0.015	m			Circun. housing	0.236			
Largo entrada inic	0.05	m			Ancho suncho	0.035	m	Ancho min 0.025 m	
Espesor	0.04	m			Cantidad sunchos	1	-		
Área sup	0.012	m2							
R acero	0.193	K/W	R conv	3.395305453	°C/W				
Q perdido	58.52091426	W							
Q perdido entrada fin					Suncho entrada fin			Observaciones	
T plástico	230	°C			Potencia Res	0.7	W/cm2	Suncho cerámico	
T exterior	20	°C			Cant cm2 cubiertos	35.863	cm2		
k acero	15.1	W/mK	h aire. Conv + rad	25	W/m2°C	Cant m2 cubiertos	0.004	m2	
Radio ext	0.0225	m			% Area cubierto	70.47%	-		
Radio int	0.004	m			Circun. housing	0.141			
Largo entrada fin	0.036	m			Ancho suncho	0.025	m	Ancho min 0.025 m	
Espesor	0.04	m			Cantidad sunchos	1	-		
Área sup	0.005	m2							
R acero	0.506	K/W	R conv	7.859503363	°C/W				
Q perdido	25.10400749	W							
Q housing					Suncho housing			Observaciones	
T plástico	230	°C			Potencia Res	0.74	W/cm2	Suncho cerámico	
T exterior	20	°C			Cant cm2 cubiertos	555.265	cm2		
k acero	15.1	W/mK	h aire. Conv + rad	25	W/m2°C	Cant m2 cubiertos	0.056	m2	
Radio ext	0.08	m			% Area cubierto	64.98%	-		
Radio int	0.04	m			Circun. housing	0.503			
Largo cabezal	0.17	m			Ancho suncho	0.110	m	Ancho min 0.025 m	
Espesor	0.04	m			Cantidad sunchos	1	-		
Área sup	0.085	m2							
R acero	0.043	K/W	R conv	0.4681027738	°C/W				
Q perdido	410.8960606	W							

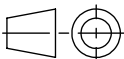
Energía necesaria para calentar el cabezal a 230 °C

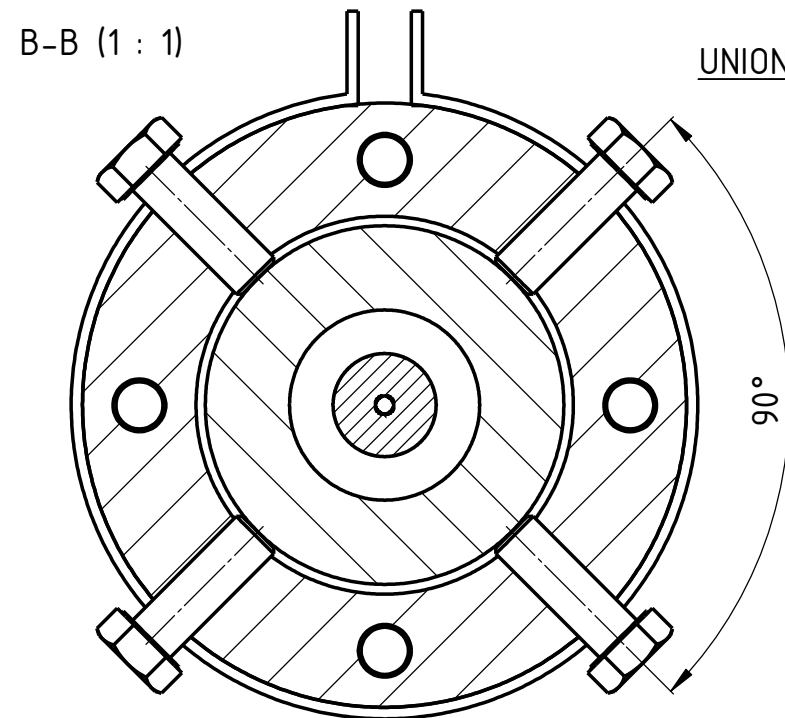
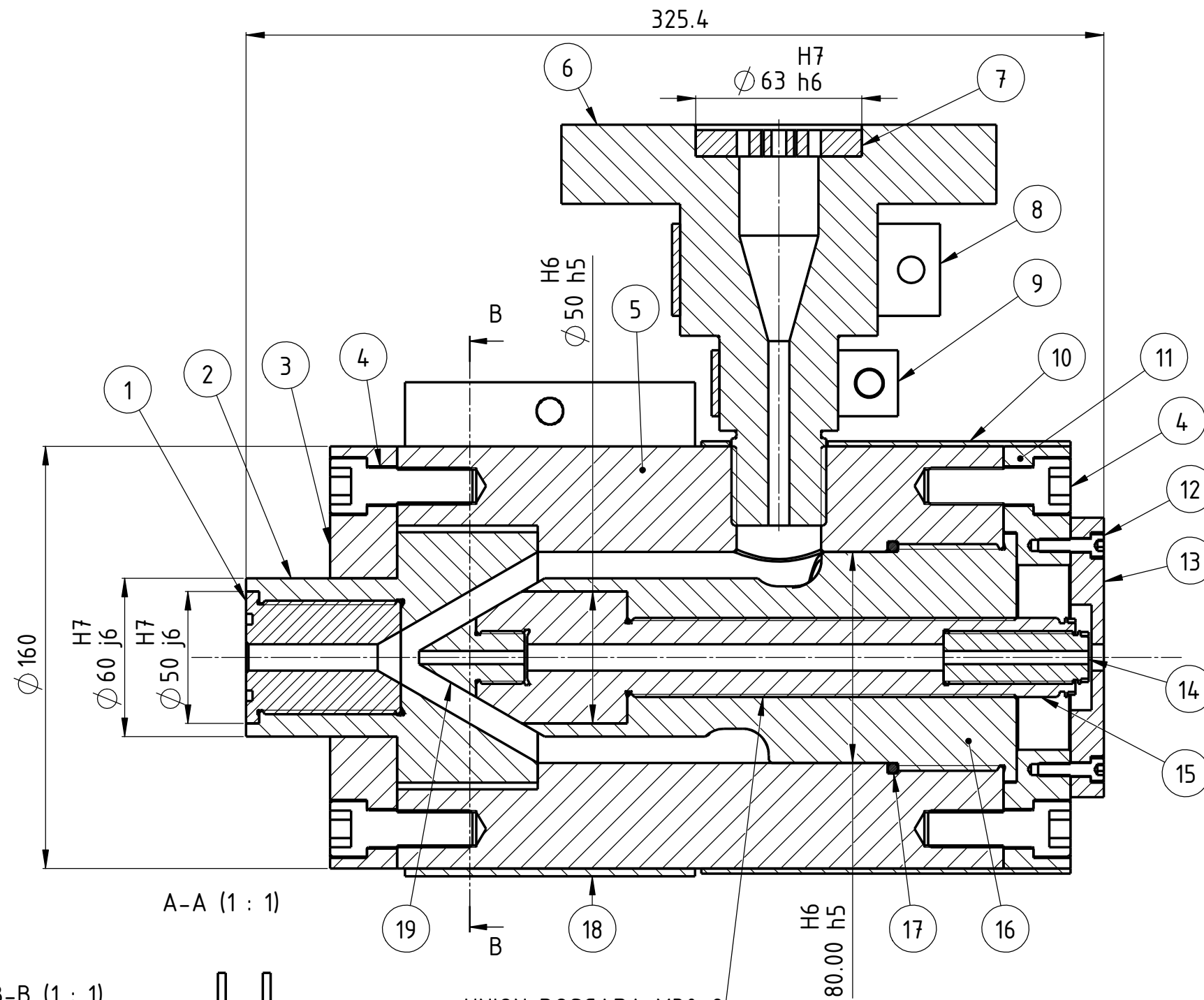
Cálculo de la energía necesaria para poder calentar el cabezal a 230°C previo al comienzo del proceso de extrusión. De este modo, se calienta el cabezal durante 15 minutos con resistencias que entregan hasta 10 W/cm². Posteriormente, se reduce la potencia entregada para entregar solo la necesaria, calculada anteriormente, para mantener el fluido a temperatura constante.

ENERGÍA NECESARIA PARA CALENTAR EL CABEZAL A 230 °C									
Calor necesario para calentar el acero de la entrada inicial			Calor necesario para calentar el acero de la entrada final			Calor necesario para calentar el acero del housing			
m entrada	3.75	Kg	m entrada	2.5	Kg	m housing	24.78	Kg	
cp	480	J/Kg°C	cp	480	J/Kg°C	cp	480	J/Kg°C	
Ti	20	°C	Ti	20	°C	Ti	20	°C	
Tf	230	°C	Tf	230	°C	Tf	230	°C	
Q	378000	J	Q	252000	J	Q	2497824	J	
t calentamiento	15	min	t calentamiento	15	min	t calentamiento	15	min	
t calentamiento	900	s	t calentamiento	900	s	t calentamiento	900	s	
W	420	W	W	280	W	W	2775.36	W	
Sunchos			Observaciones						
P entrada inic	5.1	W/cm2	Suncho cerámico. Hasta 10 W/cm2						
P entrada fin	7.8	W/cm2	Suncho cerámico. Hasta 10 W/cm2						
P housing	5	W/cm2	Suncho cerámico. Hasta 10 W/cm2						
cm2 cubiertos ent	82.353	cm2							
m2 cubiertos ent	0.008	m2							
cm2 cubiertos fin	35.897	cm2							
m2 cubiertos fin	0.004	m2							
cm2 cubiertos housing	555.072	cm2							
cm2 cubiertos housing	0.056	m2							
Radio entrada inic	0.0375	m	Diámetro mínimo 40 mm						
Radio entrada fin	0.0225	m	Diámetro mínimo 40 mm						
Radio housing	0.08	m	Diámetro mínimo 40 mm						
Circun. entrada inic	0.236	m							
Circun. entrada fin	0.141	m							
Circun. housing	0.503	m							
Ancho suncho en. in.	0.035	m	Largo entrada inic	0.05	m				
Ancho suncho en. fin	0.025	m	Largo entrada	0.036	m				
Ancho suncho hous.	0.110	m	Largo cabezal	0.17	m				

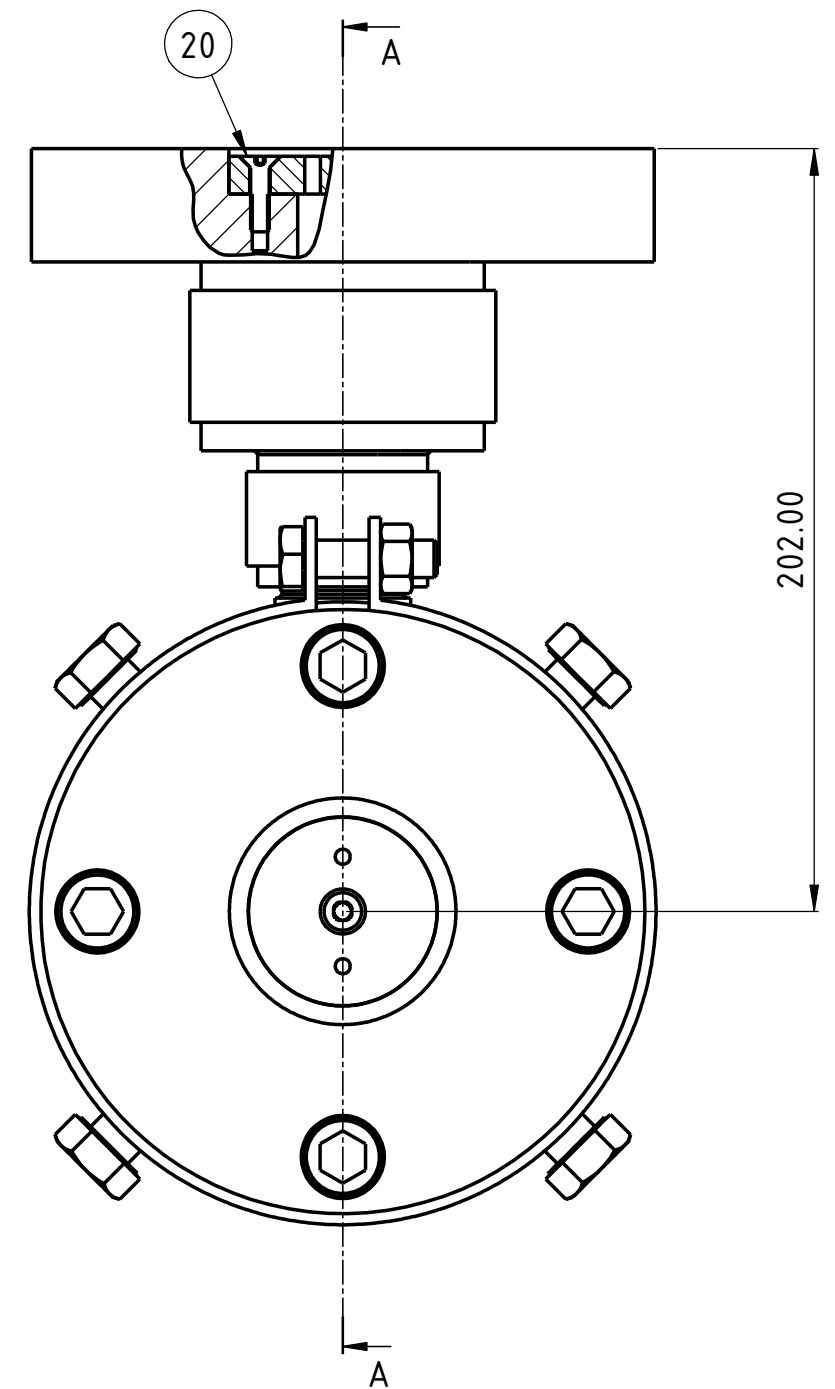
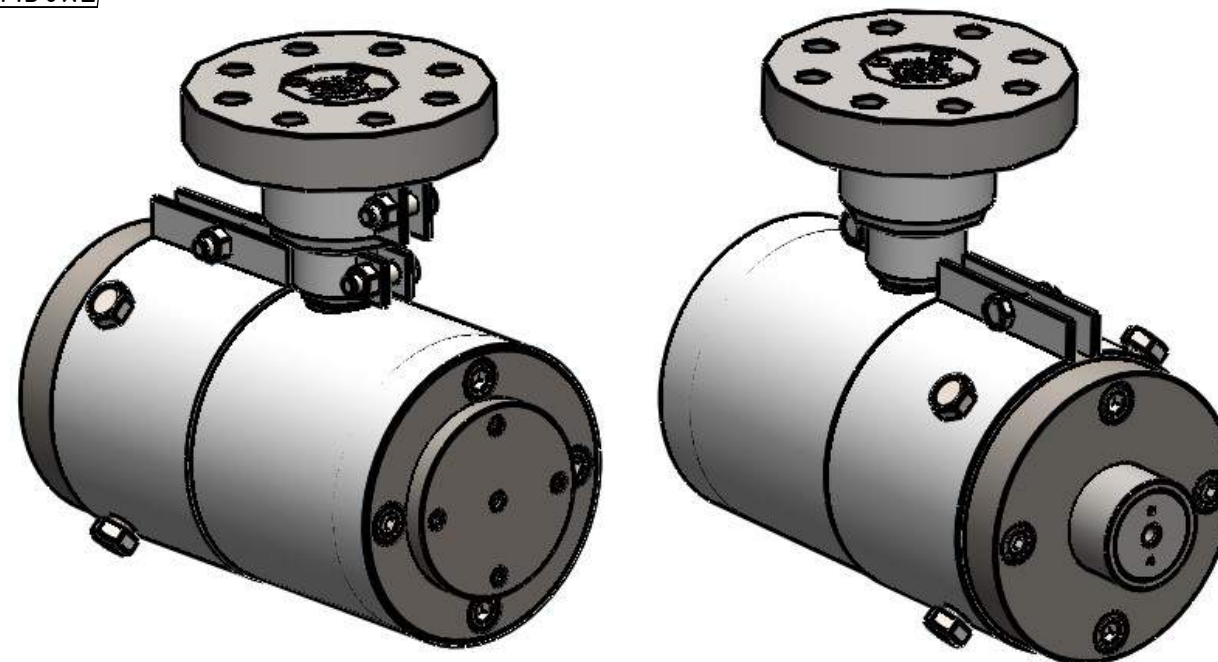
REFERENCIAS: JERARQUÍA XX.XX.XX

- 00.00.00 - REFERENCIAS
- 01.00.00 - CONJUNTO CABEZAL DE EXTRUSIÓN
 - 01.01.00 - TRAMO ENTRADA DE LA MEZCLA
 - 01.02.00 - HOUSING
 - 01.02.01 - PLANO RECTIFICADO HOUSING
 - 01.03.00 - BOQUILLA INTERIOR
 - 01.04.00 - BOQUILLA DE EXTRUSIÓN
 - 01.05.00 - MANDRIL
 - 01.06.00 - REGULACIÓN INTERIOR
 - 01.07.00 - TAPA LATERAL TRASERA
 - 01.08.00 - TAPA LATERAL DELANTERA
 - 01.09.00 - TAPA SEGURIDAD
 - 01.10.00 - CENTRADOR DELANTERO
 - 01.11.00 - CENTRADOR TRASERO
 - 01.12.00 - PLATO ROMPEDOR
- 02.00.00 - TINA DE ENFRIAMIENTO
 - 02.01.00 CONJUNTO SOLDADO
 - 02.01.01 CONJUNTO SOLDADO BASE
 - 02.01.02 CONJUNTO SOLDADO TINA
 - 02.01.02a PLEGADO TINA
 - 02.01.02b LATERAL TINA
 - 02.01.03 PLEGADO SOPORTE
 - 02.02.00 SOPORTE
 - 02.03.00 EJE
 - 02.04.00 TOPE
- 03.00.00 TRATAMIENTOS TÉRMICOS

		PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ESCUELA INGENIERIA MECANICA-UNR		00.00.00 REFERENCIAS	
	FECHA	NOMBRE	ESCALAS		PROYECTO FINAL "DISEÑO DE CABEZAL Y POST PROCESO DE EXTRUSIÓN..."
DIBUJO	20/09/23	VELOZO, M.	:		
APROBO		SABESINSKY, L.			



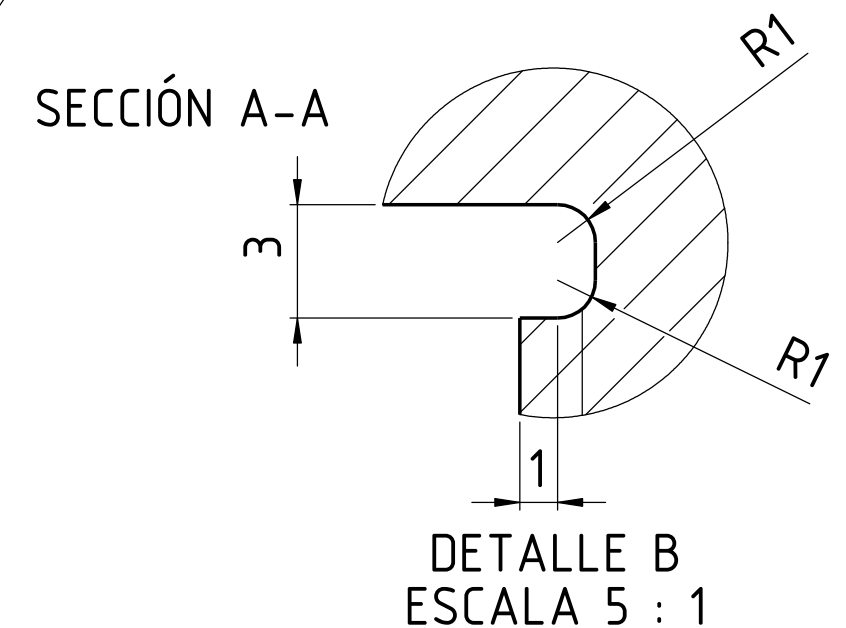
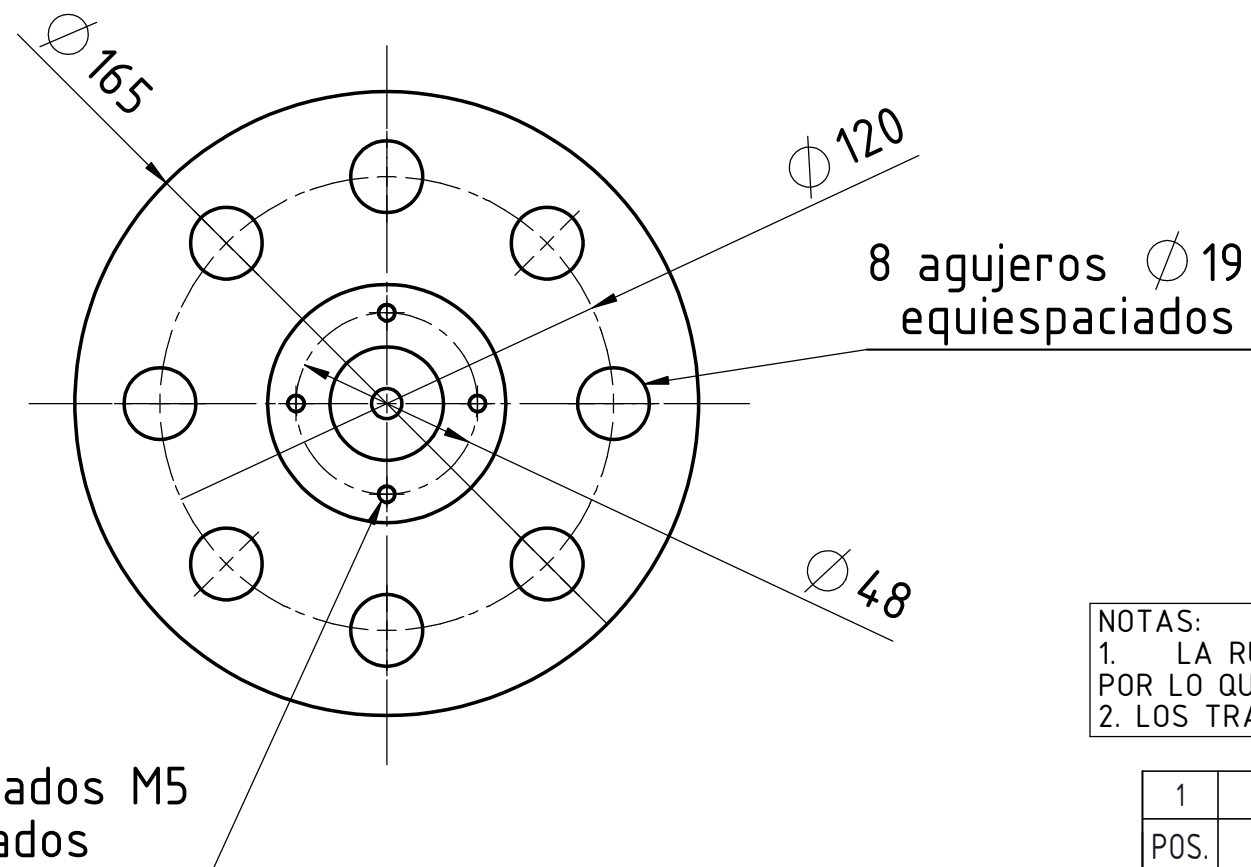
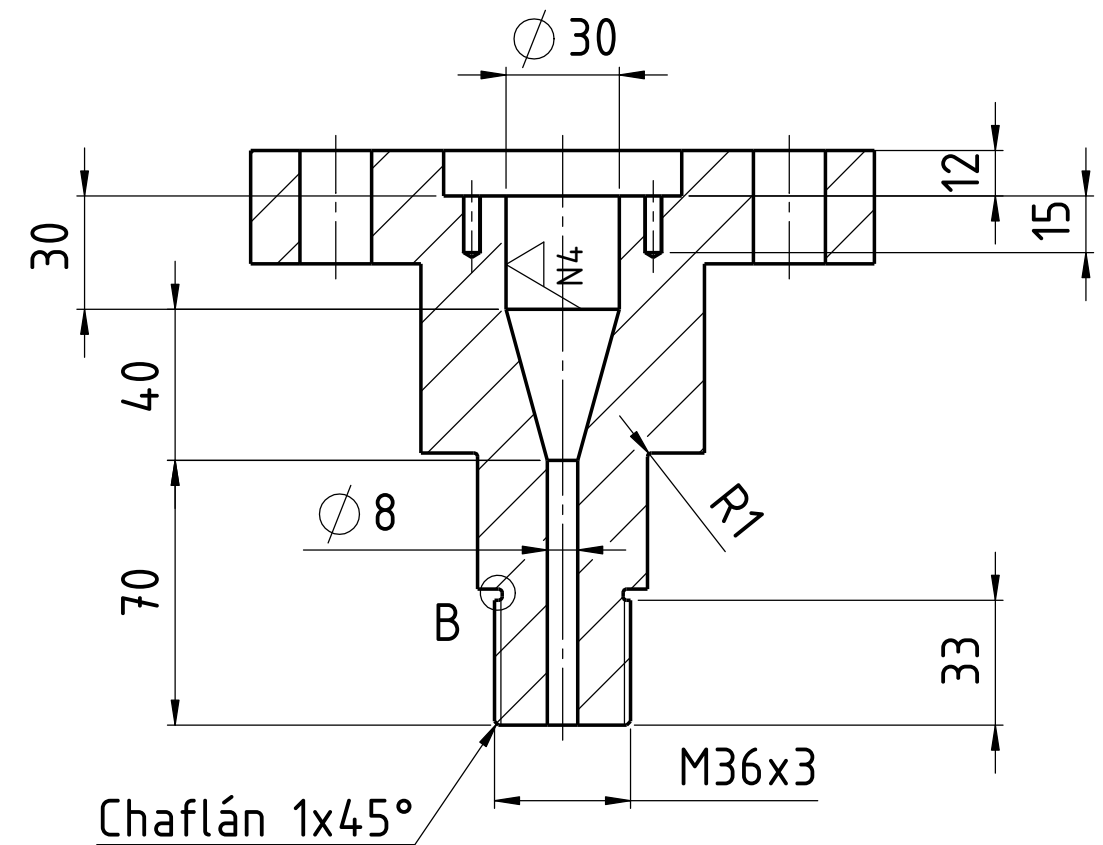
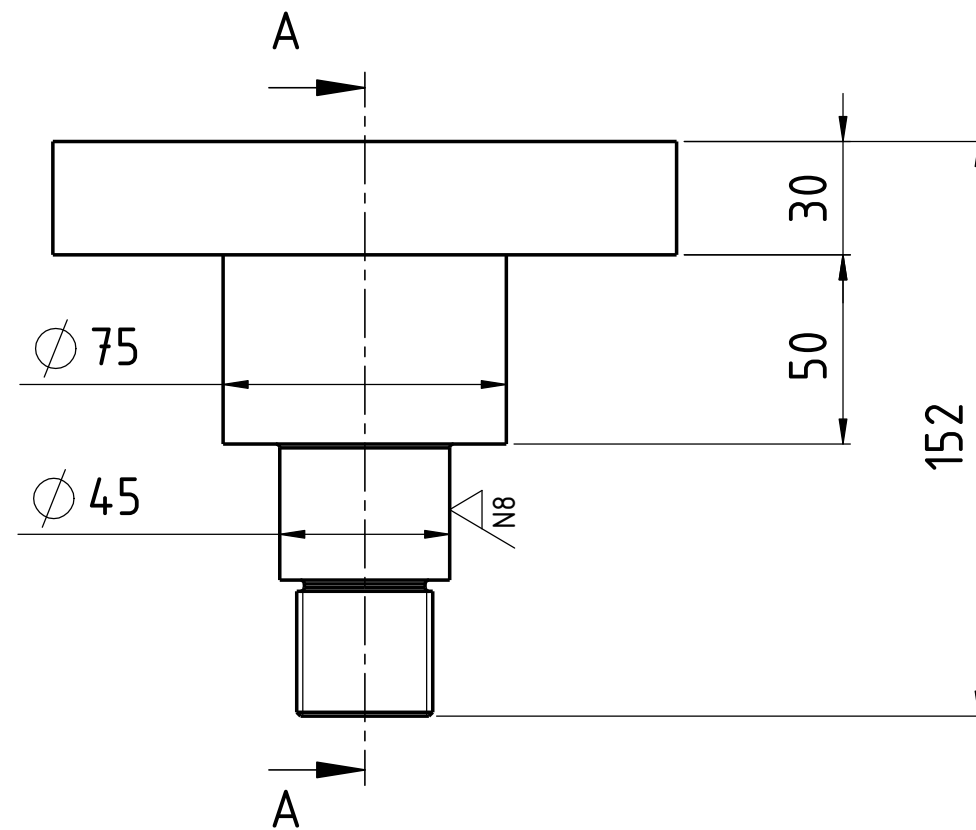
UNION ROSCADA M30x2



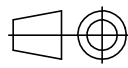
20	TORNILLO ALLEN DIN 912 M5 x 20 mm	COMERCIAL	1	-
19	CENTRADOR DELANTERO	1.2083 ~ AISI 420 MOD.	1	01.10.00
18	RESISTENCIA CALEFACTORA 3	COMERCIAL	1	-
17	SELLO TIPO ORING Ø Int 80 mm - Sección: 4mm	PTFE - COMERCIAL	1	-
16	MANDRIL	1.2083 ~ AISI 420 MOD.	1	01.05.00
15	REGULACIÓN INTERIOR	1.2083 ~ AISI 420 MOD.	1	01.06.00
14	CENTRADOR TRASERO	1.2083 ~ AISI 420 MOD.	1	01.11.00
13	TAPA SEGURIDAD	SAE 1045	1	01.09.00
12	ALLEN DIN 912 M5 x 25mm	COMERCIAL	4	-
11	TAPA LATERAL TRASERA	1.2083 ~ AISI 420 MOD.	1	01.07.00
10	AISLACIÓN TÉRMICA	COMERCIAL	1	-
9	RESISTENCIA CALEFACTORA 2	COMERCIAL	1	-
8	RESISTENCIA CALEFACTORA 1	COMERCIAL	1	-
7	PLATO ROMPEDOR	1.2083 ~ AISI 420 MOD.	1	01.12.00
6	TRAMO ENTRADA DE LA MEZCLA	1.2083 ~ AISI 420 MOD.	1	01.01.00
5	HOUSING	1.2083 ~ AISI 420 MOD.	1	01.02.00
4	ALLEN DIN 912 M14 x 55mm	COMERCIAL	8	-
3	TAPA LATERAL DELANTERA	1.2083 ~ AISI 420 MOD.	1	01.08.00
2	BOQUILLA INTERIOR	1.2083 ~ AISI 420 MOD.	1	01.03.00
1	BOQUILLA DE EXTRUSIÓN	1.2083 ~ AISI 420 MOD.	1	01.04.00
POS.	DENOMINACION	MATERIAL	CANT.	N° PLANO
 PROYECTO FINAL DE INGENIERIA MECÁNICA ESCUOLA INGENIERIA MECÁNICA-UNR		01.00.00 CONJUNTO CABEZAL DE EXTRUSIÓN		
DIBUJO	FECHA	NOMBRE	ESCALAS	
APROBO	20/09/23	VELOZO, M. BABESINSKY, L	1:2	
			PROYECTO FINAL "DISEÑO DE CABEZAL Y POST PROCESO DE EXTRUSIÓN."	

TOLERANCIAS NO ACOTADAS SEGUN NORMA DIN 2768 CALIDAD MEDIA

N8/ PARA TODAS LAS CARAS EXTERIORES

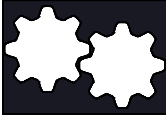


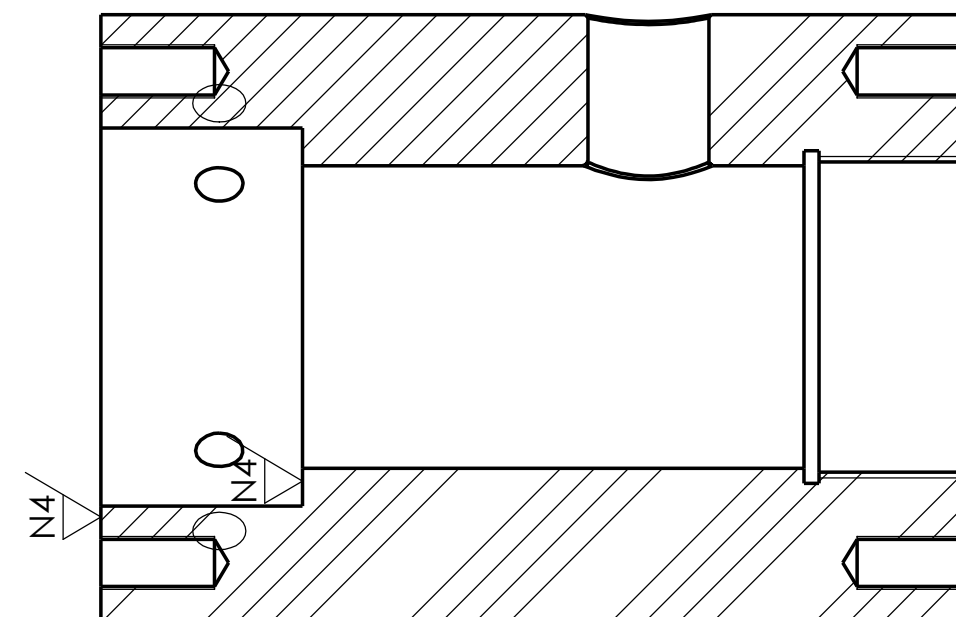
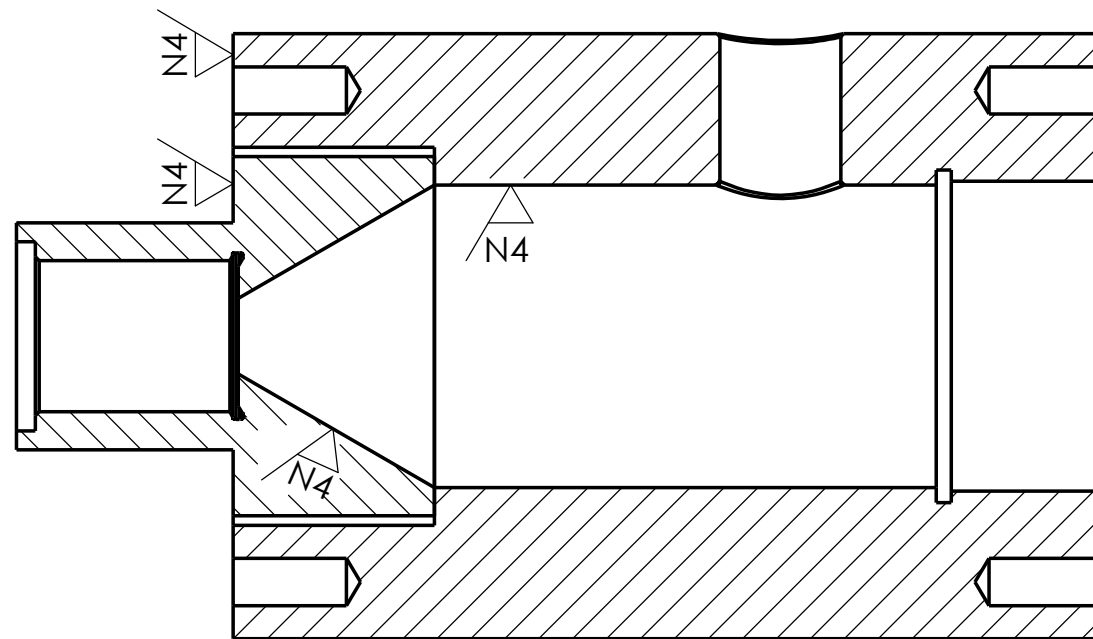
NOTAS:
1. LA RUGOSIDAD DE LOS CANALES INTERIORES DEBE SER DE 0.2 mm COMO MÁXIMO, POR LO QUE DEBE POSEER TERMINACIÓN SUPERFICIAL CON PULIDO (N4)
2. LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS PARA LA PIEZA SE ENCUENTRAN EN DOCUMENTO 03.00.00

1	REDONDO $\varnothing 180 \times 180$ mm	12083 (X40Cr14) ~ AISI 420 MOD.	1	01.01.00
POS.	DENOMINACION	MATERIAL	CANT.	N° PLANO
 PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ESCUELA INGENIERIA MECANICA-UNR		TRAMO ENTRADA DE LA MEZCLA		
	FECHA	NOMBRE	ESCALAS	
DIBUJO	15/9/21	VELOZO, M.	1:2	
APROBO		SABESINSKY, L.		
		 PROYECTO FINAL "DISEÑO DE CABEZAL Y POST PROCESO DE EXTRUSIÓN..."		

TOLERANCIAS NO ACOTADAS SEGUN NORMA DIN 2768 CALIDAD MEDIA



1	REDONDO $\varnothing$ 180x250mm	1.2083 (X40Cr14) ~ AISI 420 MOD.	1	01.02.00
POS.	DENOMINACION	MATERIAL	CANT.	N° PLANO
 PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ESCUELA INGENIERIA MECANICA-UNR		HOUSING		
	FECHA	NOMBRE	 PROYECTO FINAL "DISEÑO DE CABEZAL Y POST PROCESO DE EXTRUSIÓN..."	
DIBUJO	15/9/21	VELOZO, M.		
APROBO		SABESINSKY, L.		
			ESCALAS	
			1:2	

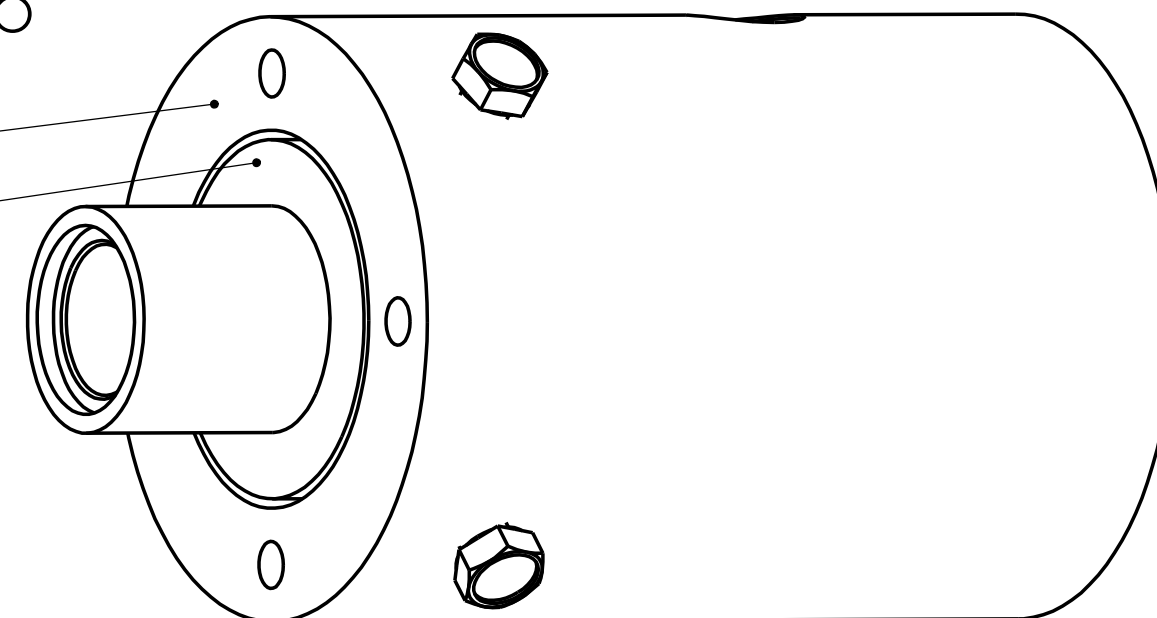


MONTAJE HOUSING + BOQUILLA INTERIOR PARA RECTIFICADO

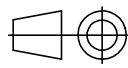
Cara de rectificado

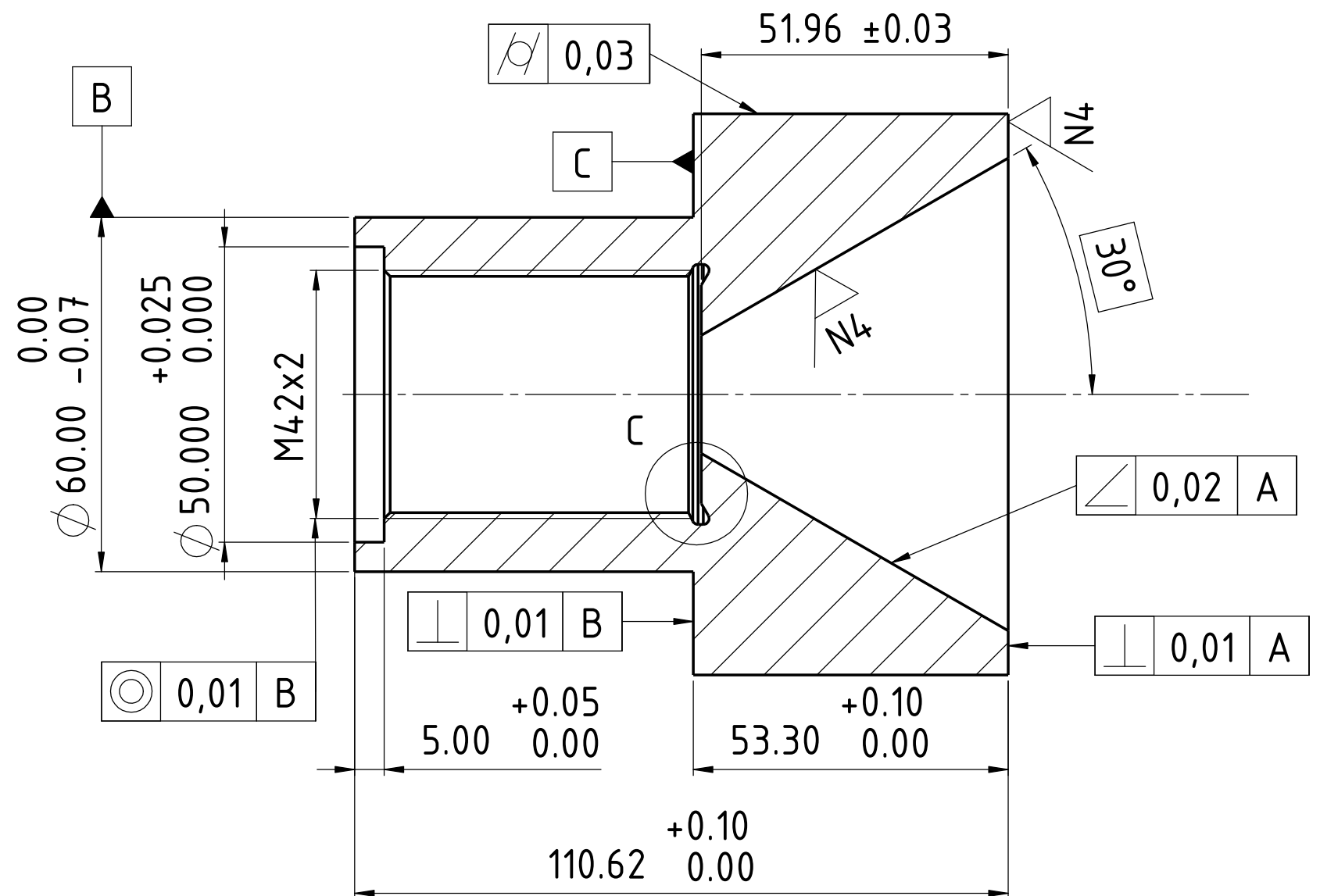
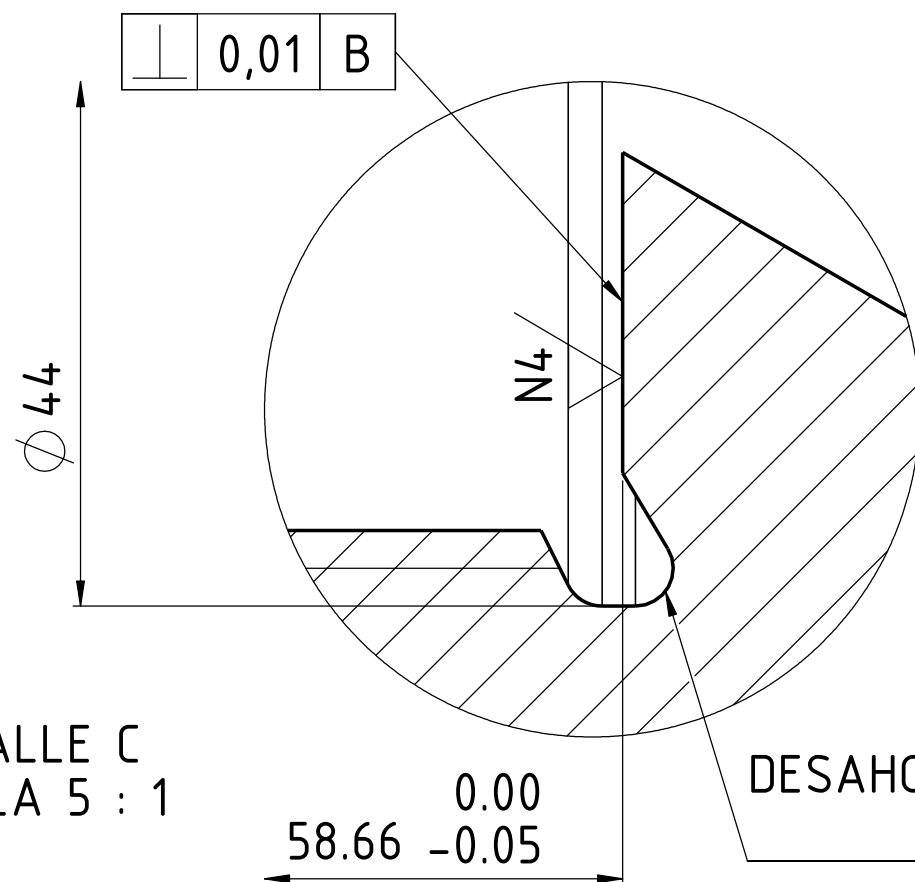
Cara de rectificado

NOTA: COLOCAR HOUSING Y BOQUILLA INTERIOR PARA RECTIFICAR LAS CARAS EXTERNAS EN CONJUNTO



TOLERANCIAS NO ACOTADAS SEGUN NORMA DIN 2768 CALIDAD MEDIA

 PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ESCUELA INGENIERIA MECANICA-UNR				01.02.01 - PLANO RECTIFICADO HOUSING	
	FECHA	NOMBRE	ESCALAS		PROYECTO FINAL "DISEÑO DE CABEZAL Y POST PROCESO DE EXTRUSIÓN..."
DIBUJO	28/8/21	VELOZO, M. SABESINSKY, L.	:		
APROBO					



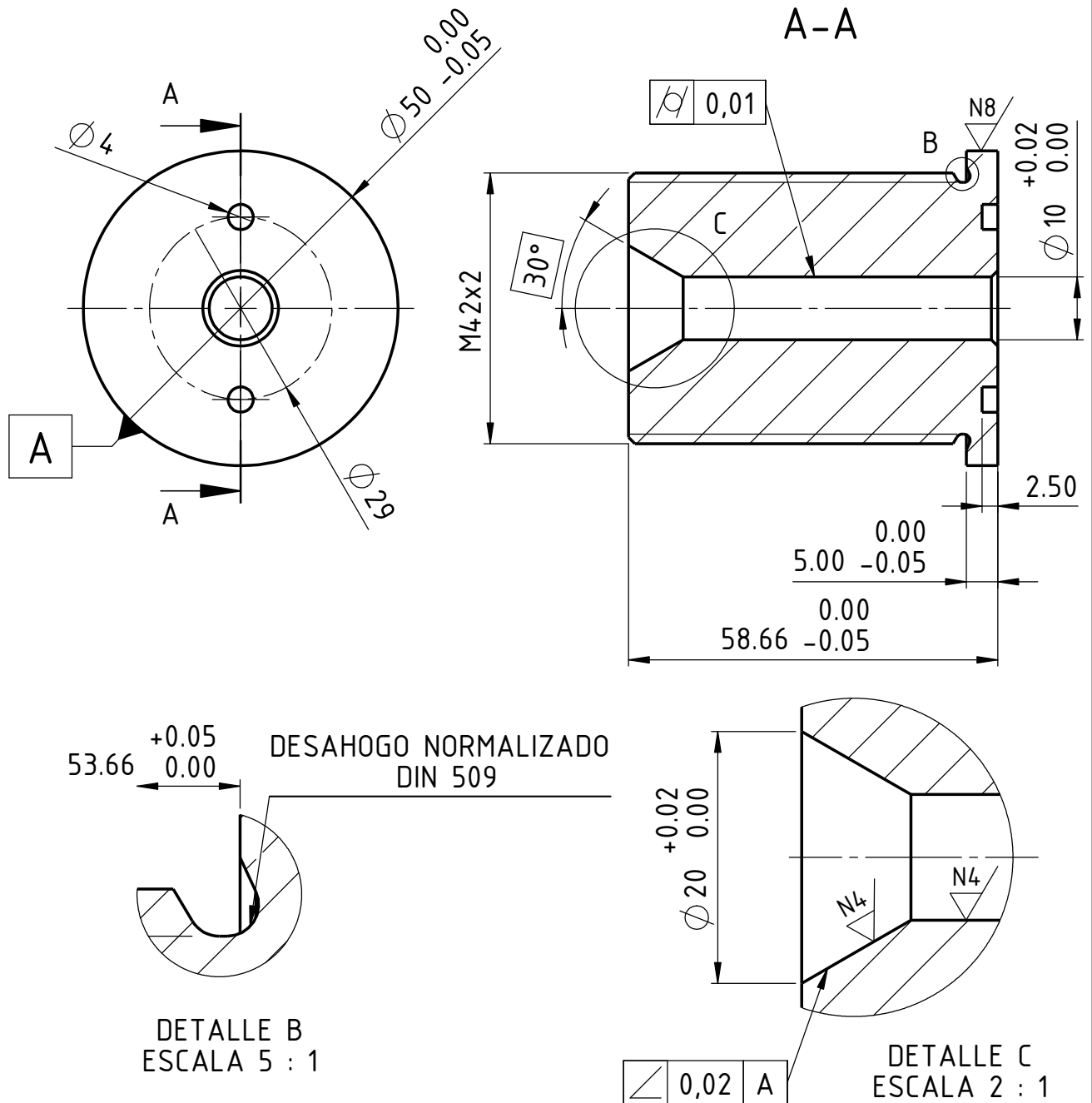
SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 1

1. LA TERMINACIÓN SUPERFICIAL DE LAS SUPERFICIES EXTERIORES
CORRESPONDE A ∇_{N8}

2. VER PLANO DE RECTIFICADO PARA CARA DE REFERENCIA C

1	REDONDO $\varnothing$ 110x150mm	1.2083 (X40Cr14) ~ AISI 420 MOD	1	01.03.00
POS.	DENOMINACION	MATERIAL	CANT.	N° PLANO
 PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ESCUELA INGENIERIA MECANICA-UNR		BOQUILLA INTERIOR		
	FECHA	NOMBRE	PROYECTO FINAL <i>"DISEÑO DE CABEZAL Y POST PROCESO DE EXTRUSIÓN..."</i>	
DIBUJO	15/9/21	VELOZO, M.		
APROBO		SABESINSKY, L.		
			ESCALAS	
			1:2	

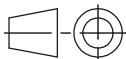
TOLERANCIAS NO ACOTADAS SEGUN NORMA DIN 2768 CALIDAD MEDIA

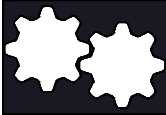


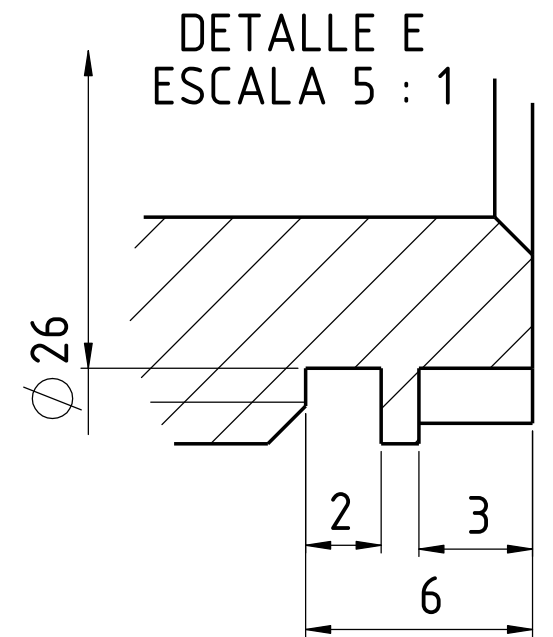
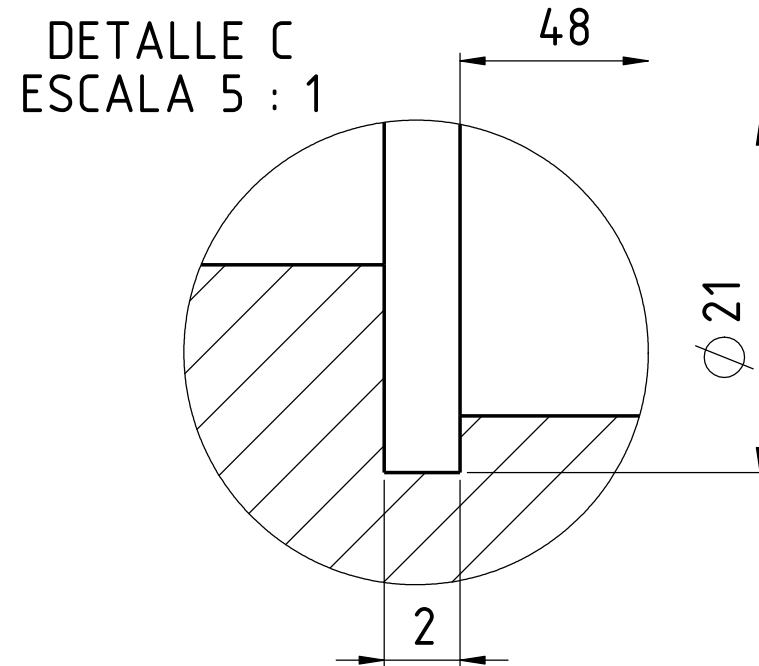
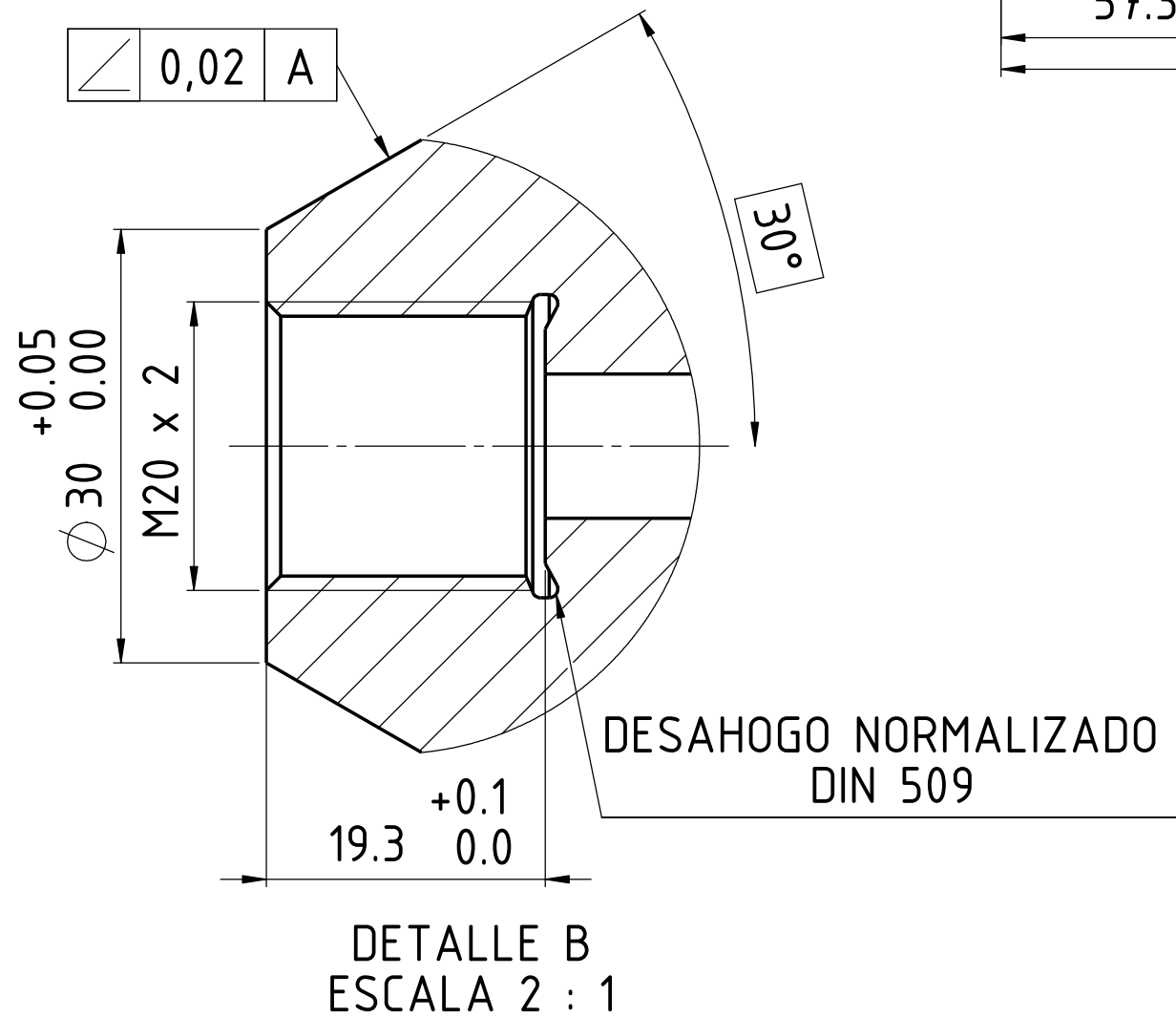
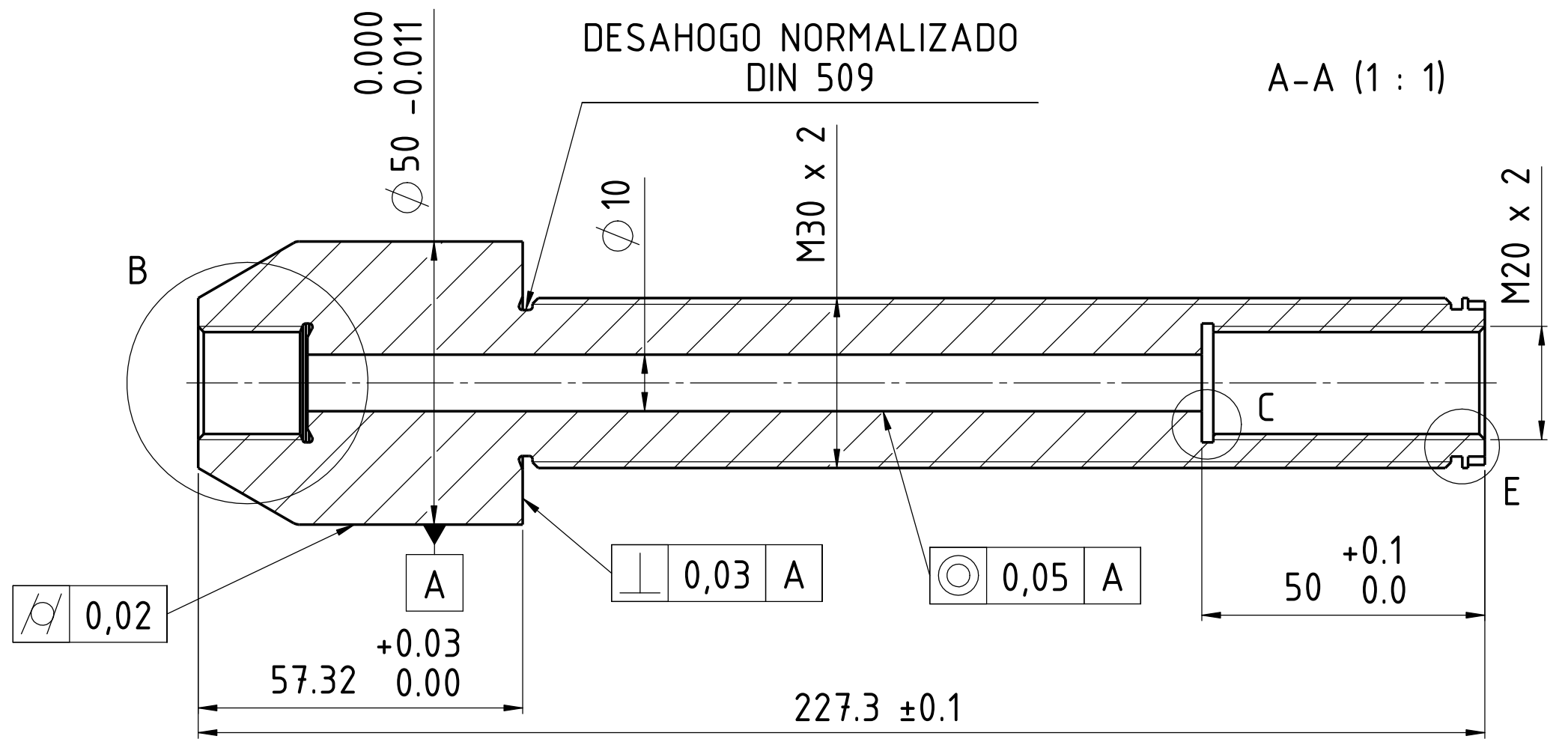
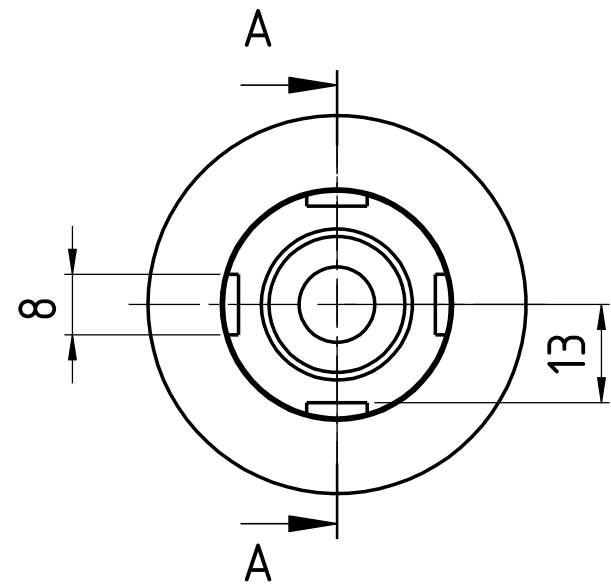
NOTAS:

- LA TERMINACIÓN SUPERFICIAL DE LAS CARAS EXTERIORES CORRESPONDE A ∇^{N8}

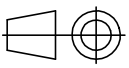
TOLERANCIAS NO ACOTADAS SEGUN NORMA DIN 2768 CALIDAD MEDIA

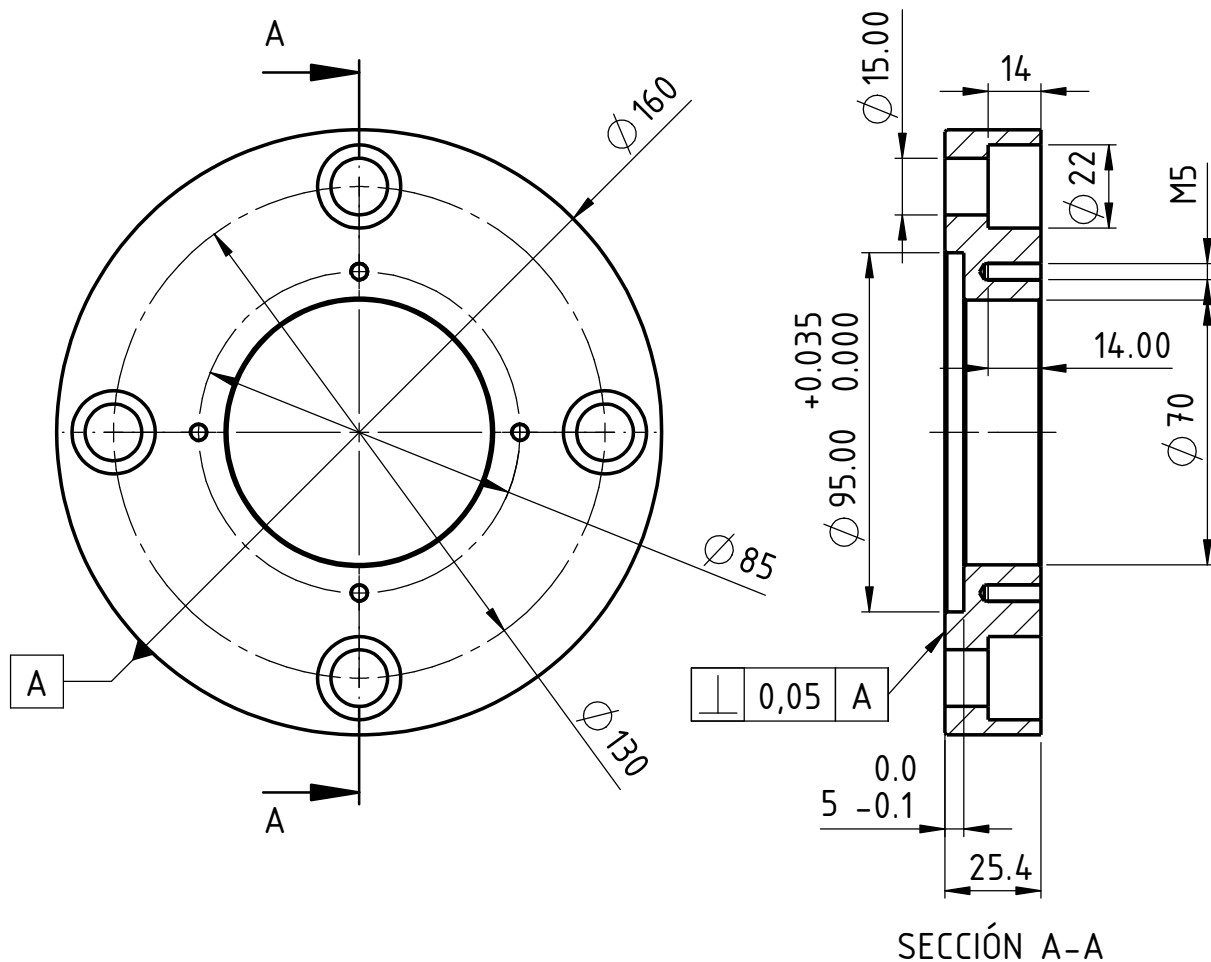
1	REDONDO $\phi 60 \times 70 \text{ mm}$	1.2083 (X40Cr15) ~ AISI 420 MOD.	1	01.04.00
POS.	DENOMINACION	MATERIAL	CANT.	N° PLANO
 PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ESCUOLA INGENIERIA MECANICA-UNR		BOQUILLA DE EXTRUSIÓN		
	FECHA	NOMBRE	ESCALAS	
DIBUJO	18/09/23	VELOZO, M.	1:2	
APROBO		SABESINSKY, L.	 PROYECTO FINAL "DISEÑO DE CABEZAL Y POST PROCESO DE EXTRUSIÓN..."	

1	REDONDO $\varnothing$ 100 x 200mm	1.2083 (X40Cr15) ~ AISI 420 MOD.	1	01.05.00
POS.	DENOMINACION	MATERIAL	CANT.	Nº PLANO
 PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ESCUELA INGENIERIA MECANICA-UNR		MANDRIL		
	FECHA	NOMBRE	 PROYECTO FINAL "DISEÑO DE CABEZAL Y POST PROCESO DE EXTRUSIÓN..."	
DIBUJO	18/9/23	VELOZO, M.		
APROBO		SABESINSKY, L.		
			ESCALAS	
			1:2	



TOLERANCIAS NO ACOTADAS SEGUN NORMA DIN 2768 CALIDAD MEDIA

1	REDONDO $\varnothing 60 \times 240$ mm	1.2083 (X40Cr15) ~ AISI 420 MOD.	1	01.06.00
POS.	DENOMINACION	MATERIAL	CANT.	N° PLANO
 PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ESCUELA INGENIERIA MECANICA-UNR		REGULACIÓN INTERIOR		
DIBUJO	FECHA	NOMBRE	ESCALAS	 PROYECTO FINAL "DISEÑO DE CABEZAL Y POST PROCESO DE EXTRUSIÓN..."
APROBO	18/9/21	VELOZO, M. SABESINSKY, L.	1:1	

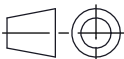


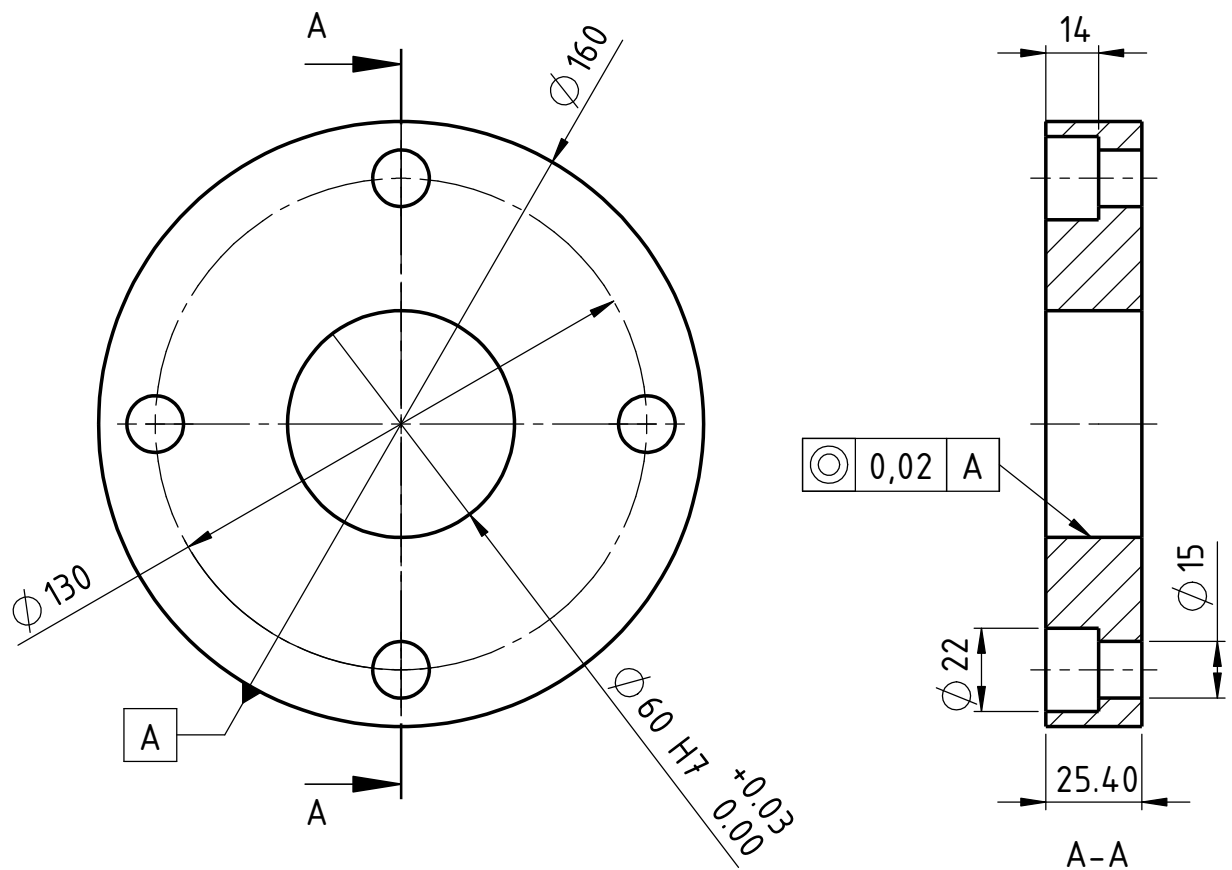
NOTAS:

1. TERMINACIÓN SUPERFICIAL GENERAL CORRESPONDE A
2. VER PLANO TRATAMIENTO TÉRMICO

N8

TOLERANCIAS NO ACOTADAS SEGUN NORMA DIN 2768 CALIDAD MEDIA

1	REDONDO $\varnothing 170 \times 30$ mm	1.2083 (X40Cr15) ~ AISI 420 MOD.	1	01.07.00
POS.	DENOMINACION	MATERIAL	CANT.	N° PLANO
 PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ESCUELA INGENIERIA MECANICA-UNR		TAPA LATERAL TRASERA		
DIBUJO	FECHA	NOMBRE	ESCALAS	 PROYECTO FINAL "DISEÑO DE CABEZAL Y POST PROCESO DE EXTRUSIÓN..."
APROBO	20/09/2023	VELOZO, M. SABESINSKY, L.	1:2	



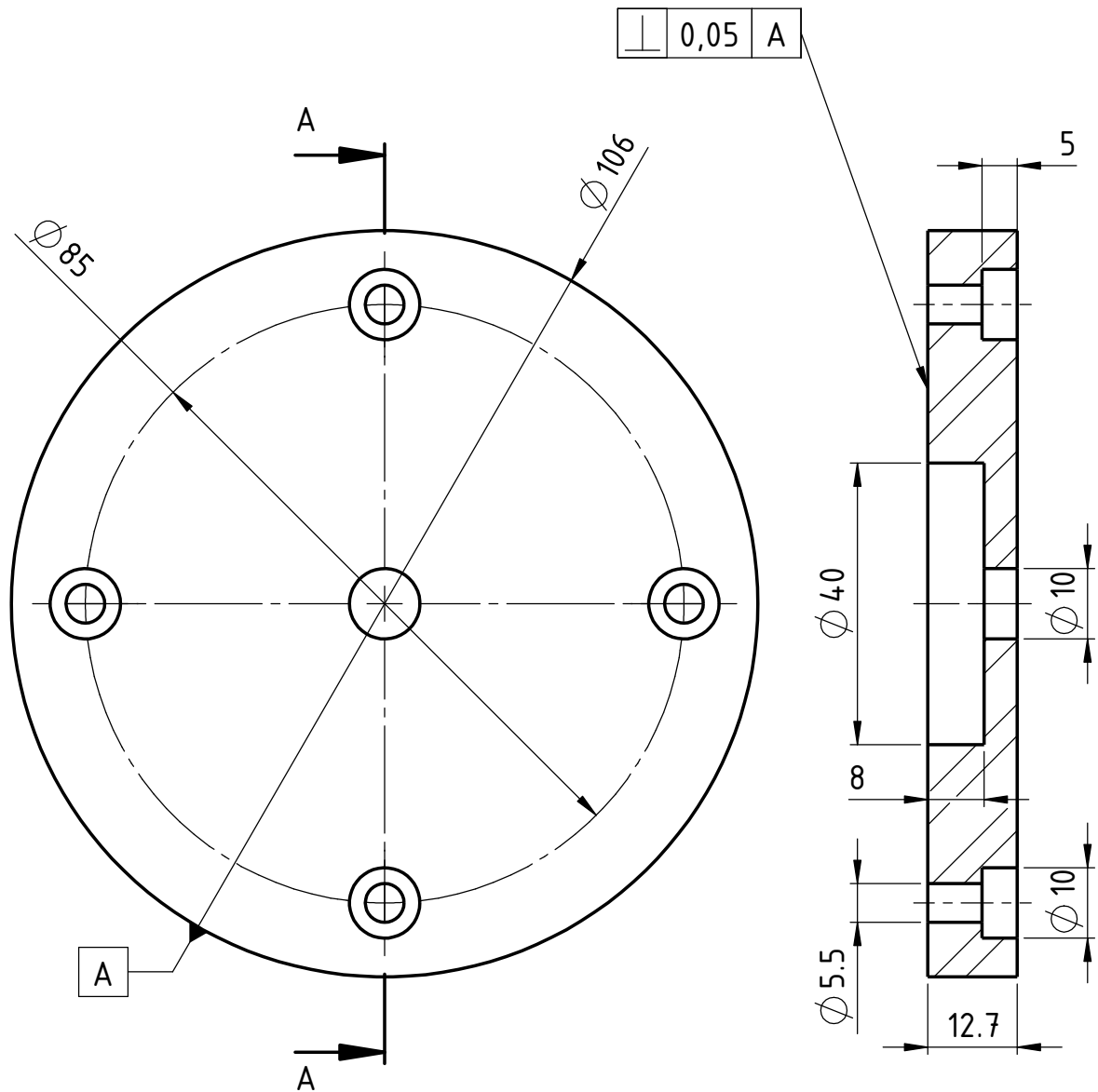
NOTAS:

1. TERMINACIÓN SUPERFICIAL GENERAL CORRESPONDE A ∇

N8

TOLERANCIAS NO ACOTADAS SEGUN NORMA DIN 2768 CALIDAD MEDIA

1	REDONDO $\varnothing 170 \times 30 \text{ mm}$	1.2083 (X40Cr15) ~ AISI 420 MOD.	1	01.08.00
POS.	DENOMINACION	MATERIAL	CANT.	PLANO N°
 PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ESCUELA INGENIERIA MECANICA-UNR		TAPA LATERAL DELANTERA		
	FECHA	NOMBRE	ESCALAS	
DIBUJO	20/09/23	VELOZO, M.	1:2	
APROBO		SABESINSKY, L.	 PROYECTO FINAL "DISEÑO DE CABEZAL Y POST PROCESO DE EXTRUSIÓN..."	



SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 1

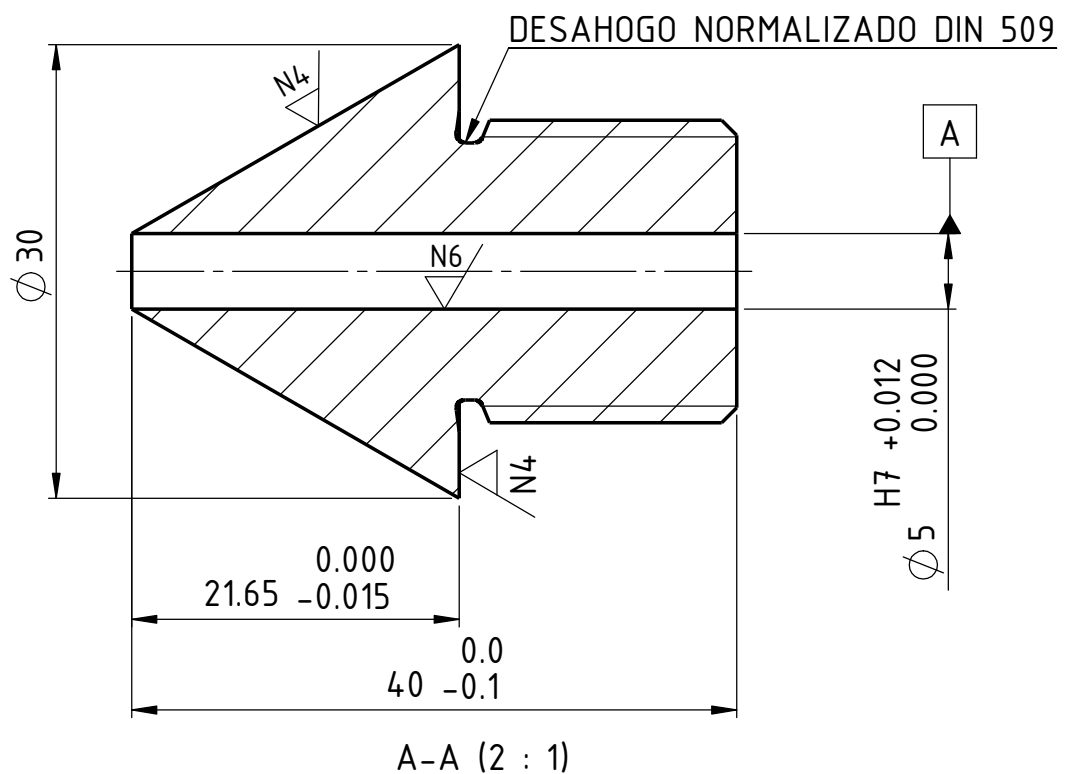
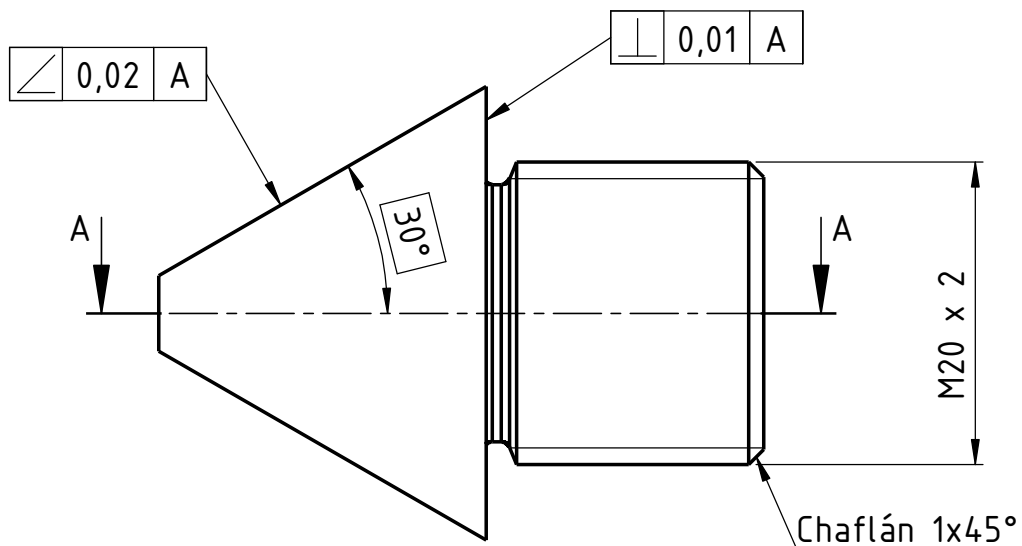
NOTAS:

1. TERMINACIÓN SUPERFICIAL GENERAL CORRESPONDE A



TOLERANCIAS NO ACOTADAS SEGUN NORMA DIN 2768 CALIDAD MEDIA

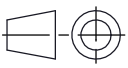
1	REDONDO $\varnothing$ 116 x 15 mm	SAE 1045	1	01.09.00
POS.	DENOMINACION	MATERIAL	CANT.	N° PLANO
 PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ESCUELA INGENIERIA MECANICA-UNR		TAPA SEGURIDAD		
	FECHA	NOMBRE	ESCALAS	
DIBUJO	20/09/23	VELOZO, M.	1:1	
APROBO		SABESINSKY, L.		
				PROYECTO FINAL "DISEÑO DE CABEZAL Y POST PROCESO DE EXTRUSIÓN..."



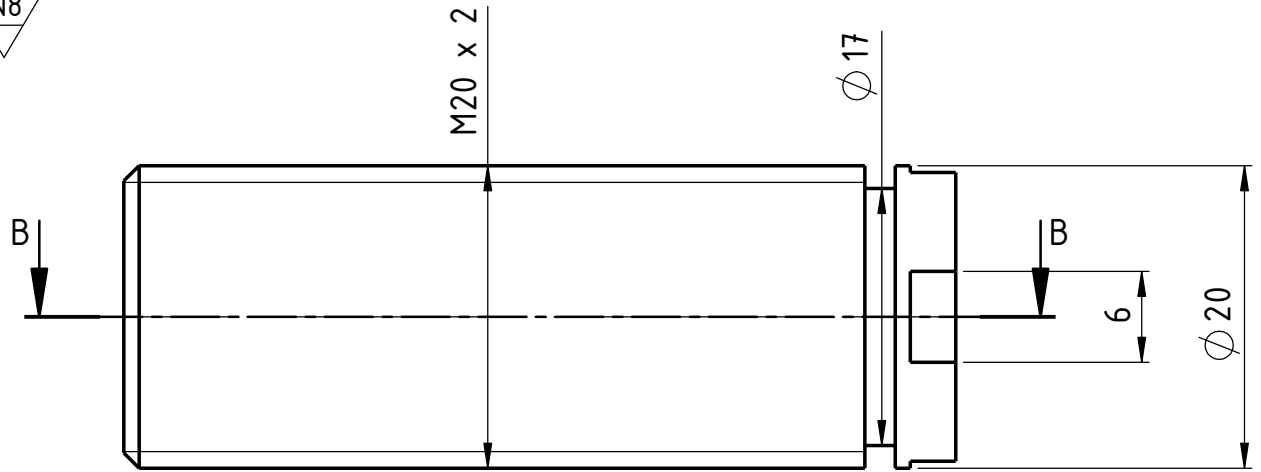
NOTAS:

1. SUPERFICIES EXTERIORES CON TERMINACIÓN SUP. PULIDAS
2. VER PLANO TT

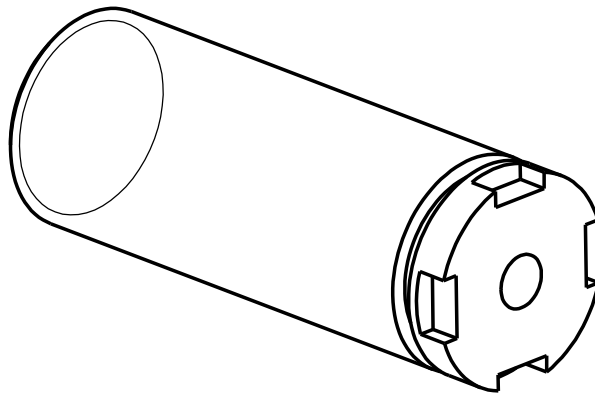
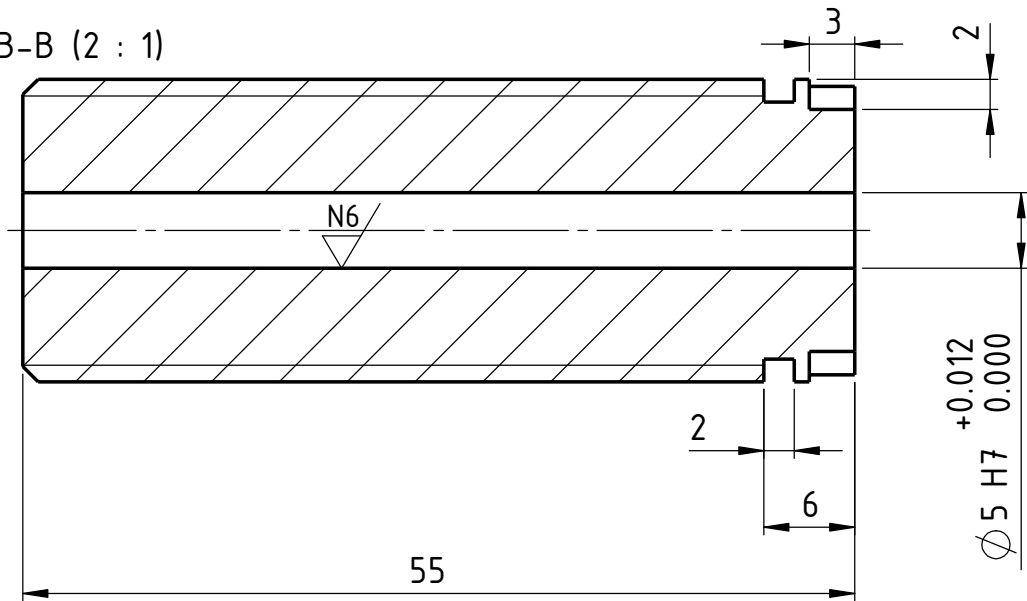
TOLERANCIAS NO ACOTADAS SEGUN NORMA DIN 2768 CALIDAD MEDIA

1	REDONDO $\varnothing$ 40 x 50 mm		1.2083 (X40Cr15) ~ AISI 420 MOD.	1	01.10.00
POS.	DENOMINACION		MATERIAL	CANT.	N° PLANO
 PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ESCUELA INGENIERIA MECANICA-UNR			CENTRADOR DELANTERO		
	FECHA	NOMBRE	ESCALAS 2:1	 PROYECTO FINAL "DISEÑO CABEZAL Y POST PROCESO DE EXTRUSIÓN..."	
DIBUJO	20/09/23	VELOZO, M.			
APROBO		SABESINSKY, L.			

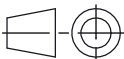
N8

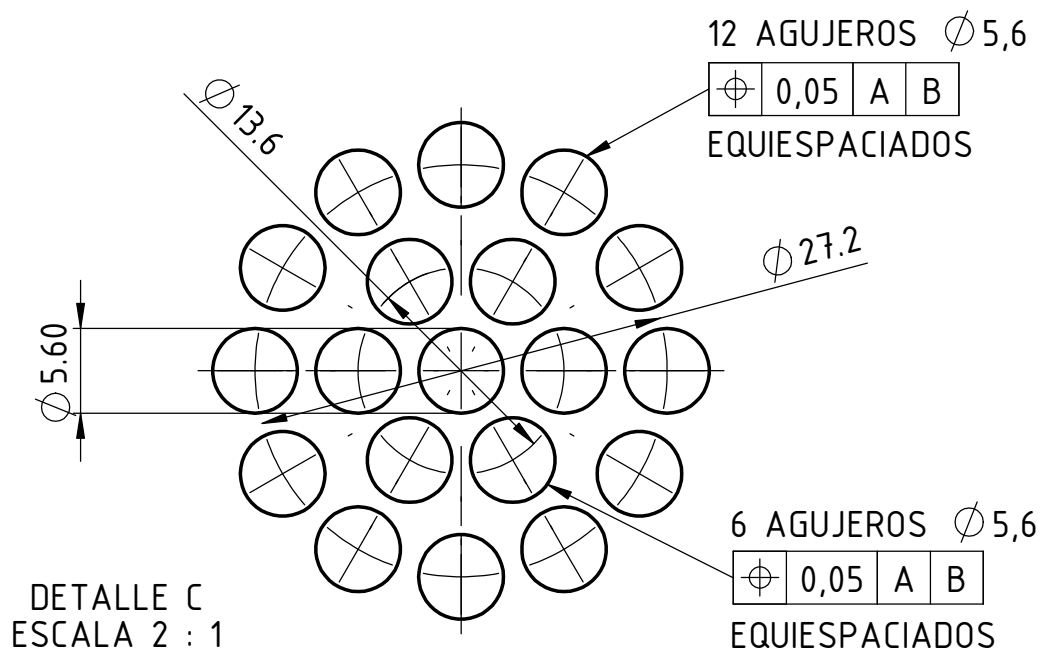
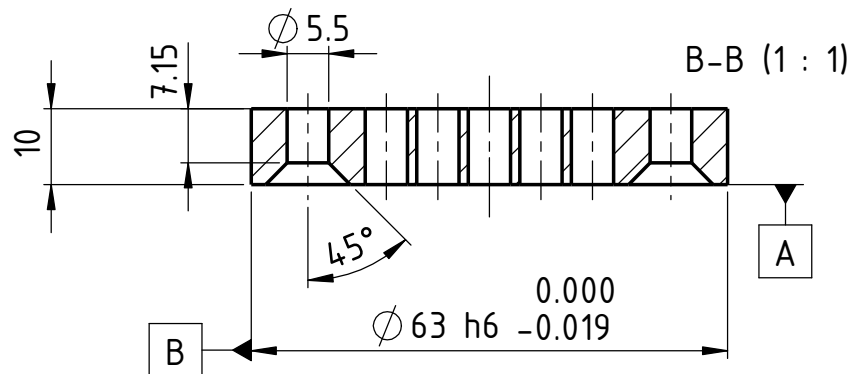
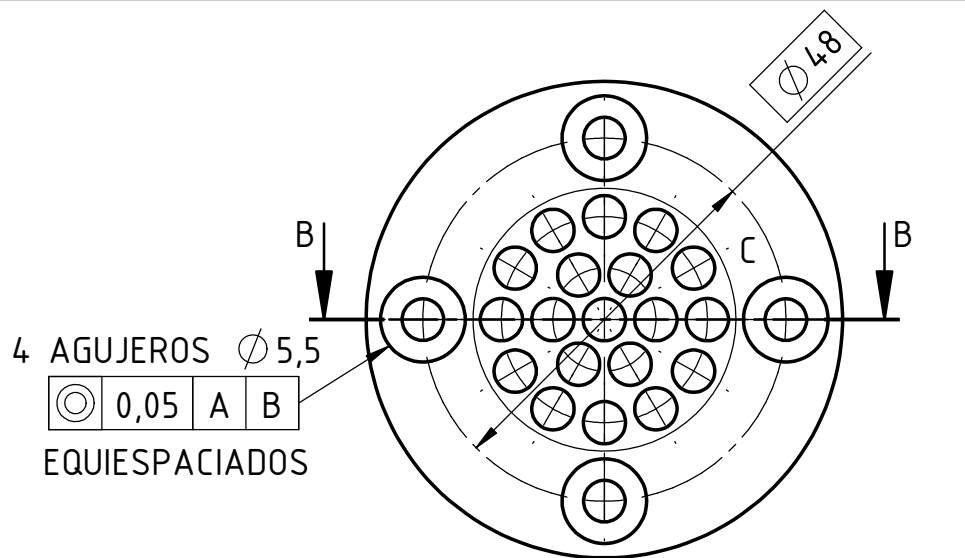


B-B (2 : 1)

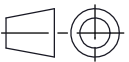


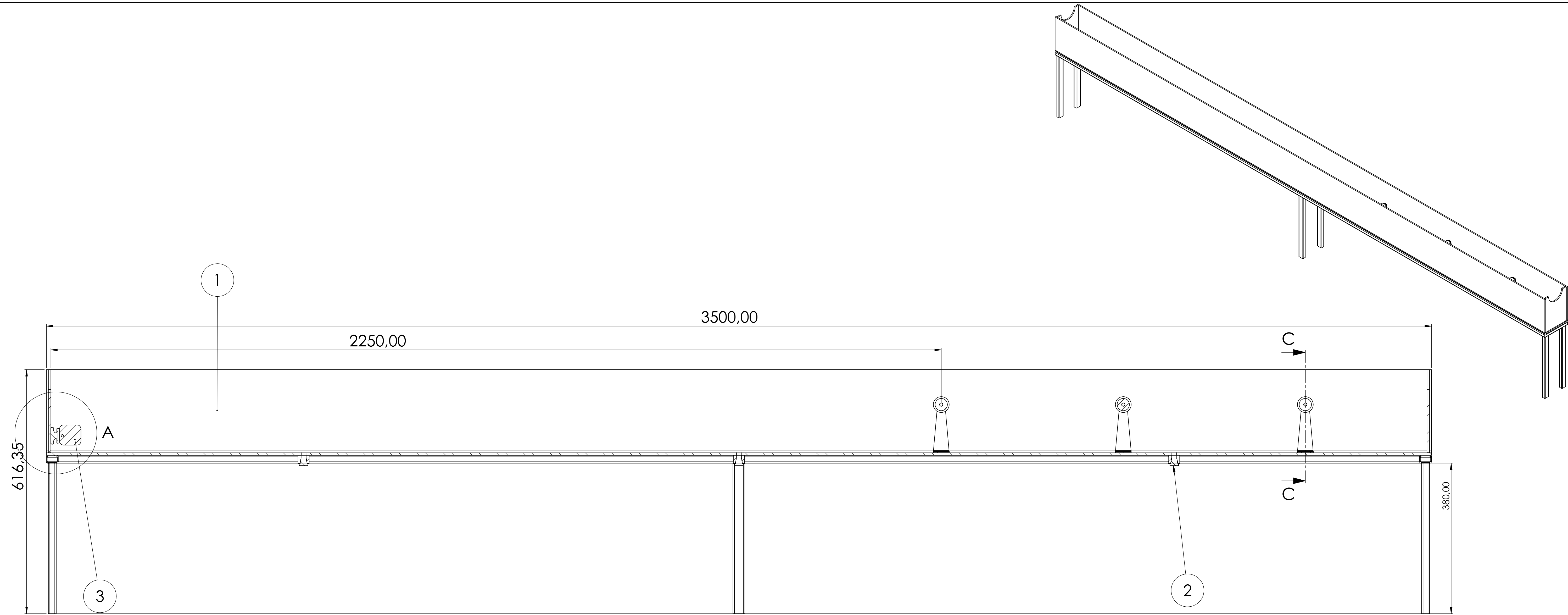
TOLERANCIAS NO ACOTADAS SEGUN NORMA DIN 2768 CALIDAD MEDIA

1	REDONDO $\varnothing 30 \times 65$ mm	1.2083 (X40Cr15) ~ AISI 420 MOD.	1	01.11.00
POS.	DENOMINACION	MATERIAL	CANT.	N° PLANO
 PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ESCUELA INGENIERIA MECANICA-UNR		CENTRADOR TRASERO		
	FECHA	NOMBRE	ESCALAS	
DIBUJO	20/09/23	VELOZO, M.	2:1	
APROBO		SABESINSKY, L.	 PROYECTO FINAL "DISEÑO DE CABEZAL Y POST PROCESO DE EXTRUSIÓN..."	

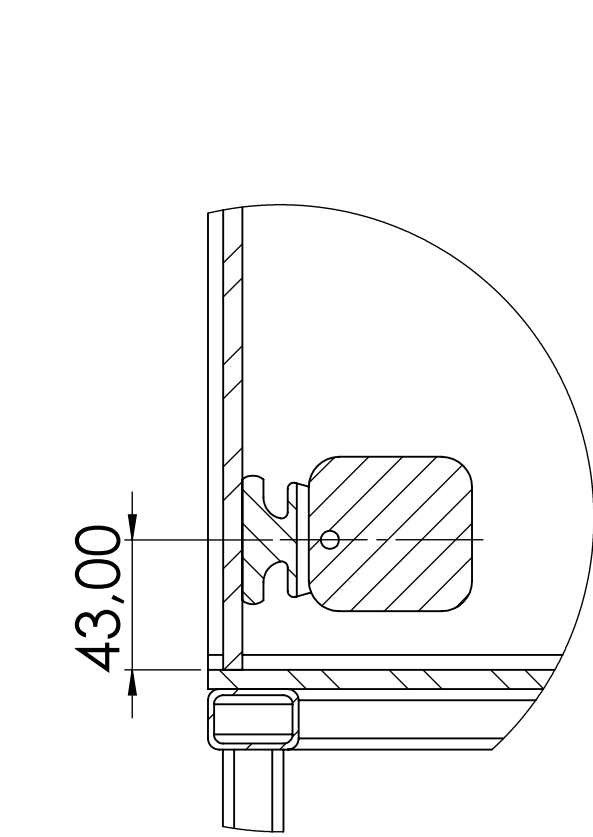
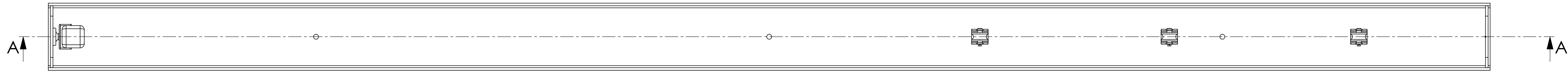


TOLERANCIAS NO ACOTADAS SEGUN NORMA DIN 2768 CALIDAD MEDIA

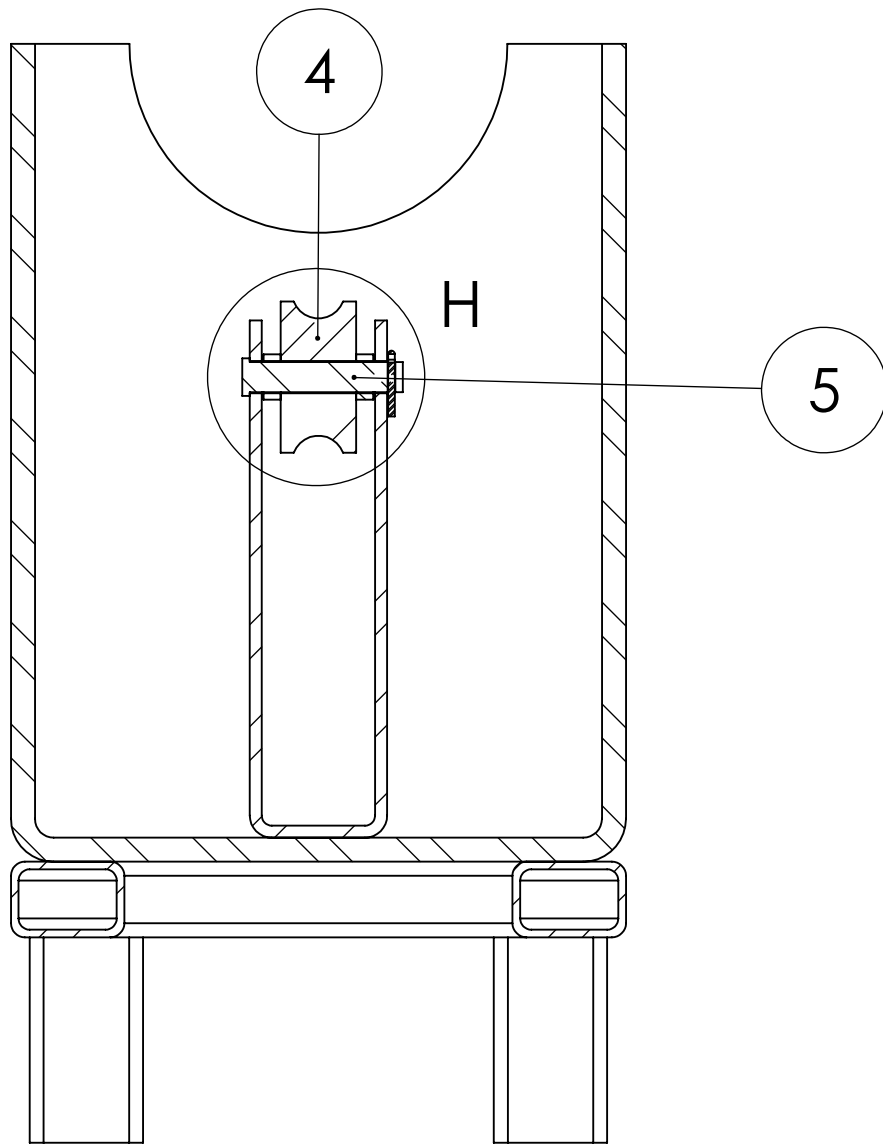
1	REDONDO $\varnothing 70 \times 12,7$ mm	1.2083 (X40Cr15) ~ AISI 420 MOD.	1	01.12.00
POS.	DENOMINACION	MATERIAL	CANT.	N° PLANO
 PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ESCUELA INGENIERIA MECANICA-UNR		PLATO ROMPEDOR		
	FECHA	NOMBRE	ESCALAS	
DIBUJO	20/09/23	VELOZO, M.	1:1	
APROBO		SABESINSKY, L.	 PROYECTO FINAL "DISEÑO DE CABEZAL Y POST PROCESO DE EXTRUSIÓN..."	



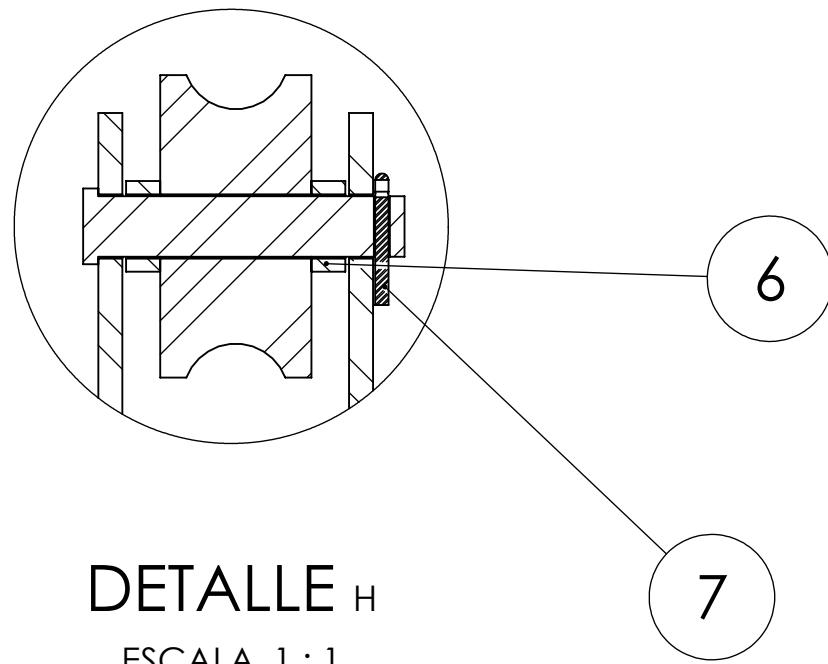
SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 5



DETALLE A
ESCALA 2 : 5



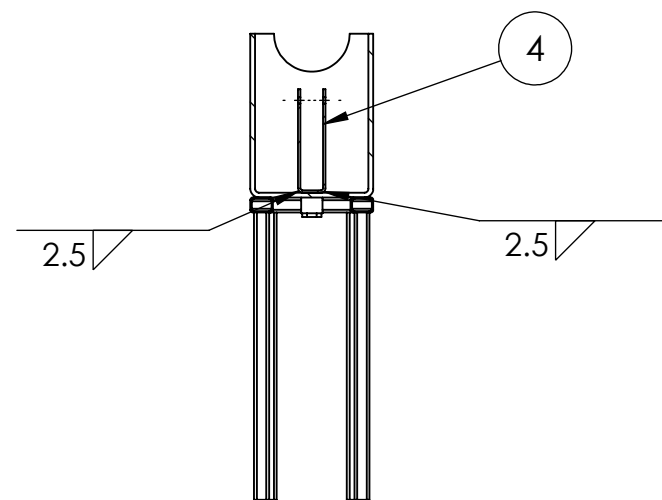
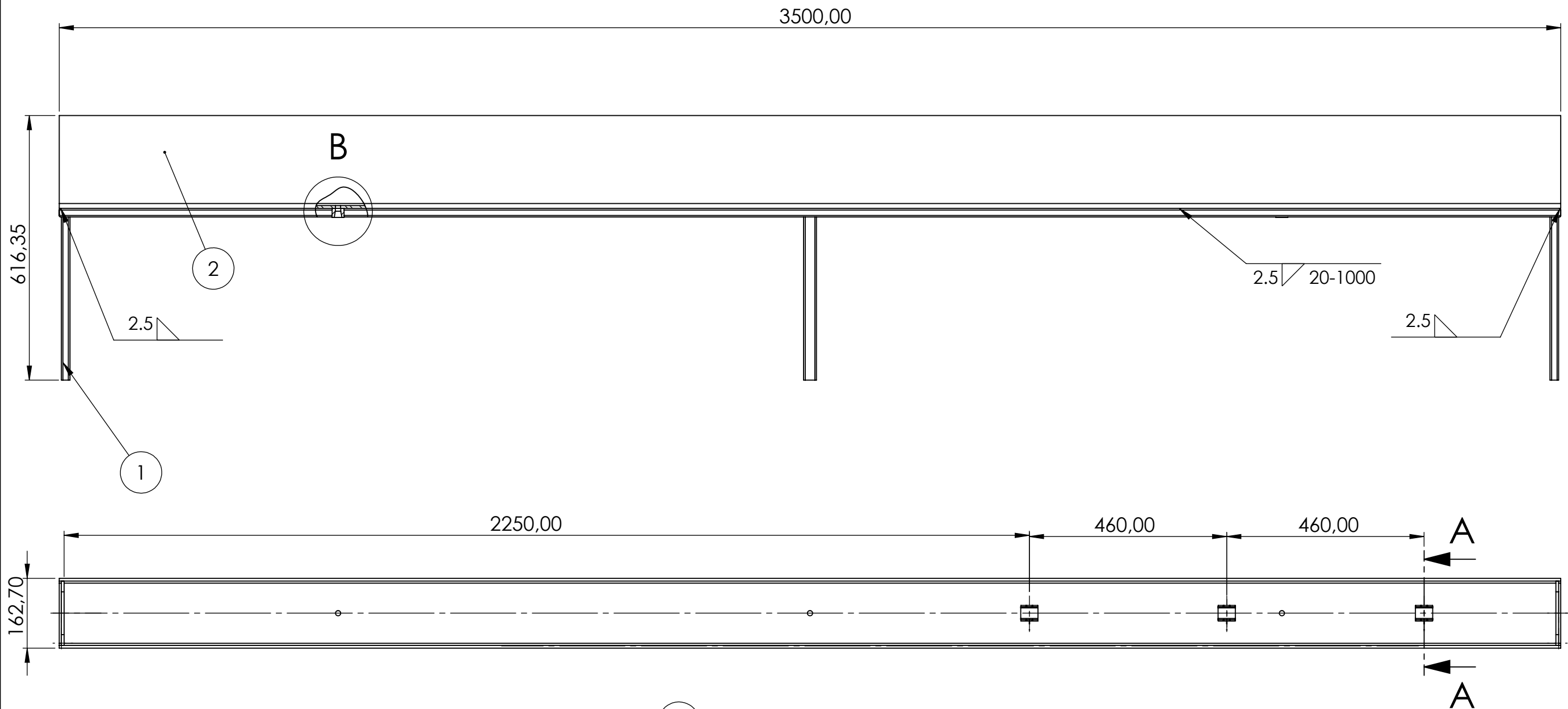
SECCIÓN C-C
ESCALA 1 : 2



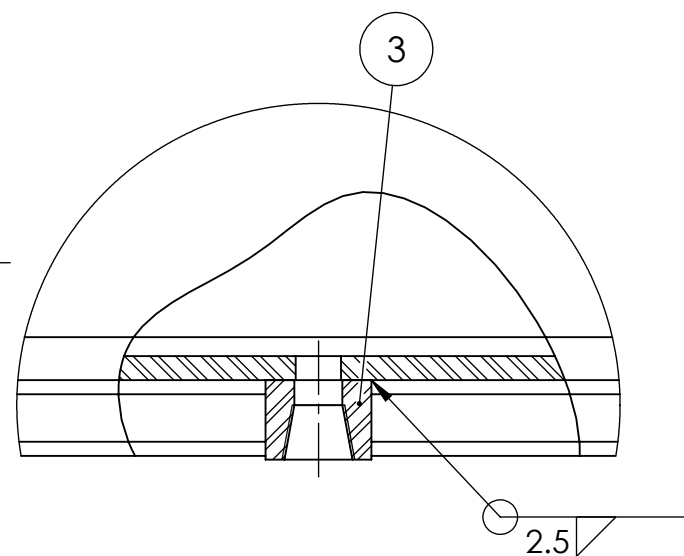
DETALLE H
ESCALA 1 : 1

7	PASADOR DE ALETAS 2x15 INOX	COMERCIAL	3	
6	TOPE	UHMW	6	02.04.00
5	EJE	AISI 304	3	02.03.00
4	SOPORTE	UHMW	3	02.02.00
3	AGITADOR VOYAGER NANO MOD 1000	COMERCIAL	1	
2	TAPÓN CAB HEX 1/2 "	COMERCIAL	3	
1	CONJUNTO SOLDADO		1	02.01.00
POS.	DENOMINACION	MATERIAL	CANT.	N° PLANO
		PROYECTO FINAL DE INGENIERIA MECANICA		
ESCUELA INGENIERIA MECANICA-UNR		02.00.00 TINA DE ENFRIAMIENTO		
DIBUJO	FECHA	NOMBRE	ESCALAS	
APROBO	17/09/2023	VELOZO, M. SABELINSKY, L.	1: 5	
			PROYECTO FINAL "DISEÑO DE CABEZAL Y POST PROCESO DE EXTRUSIÓN."	

TOLERANCIAS NO ACOTADAS SEGUN NORMA DIN 2768 CALIDAD MEDIA

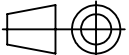


SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 10

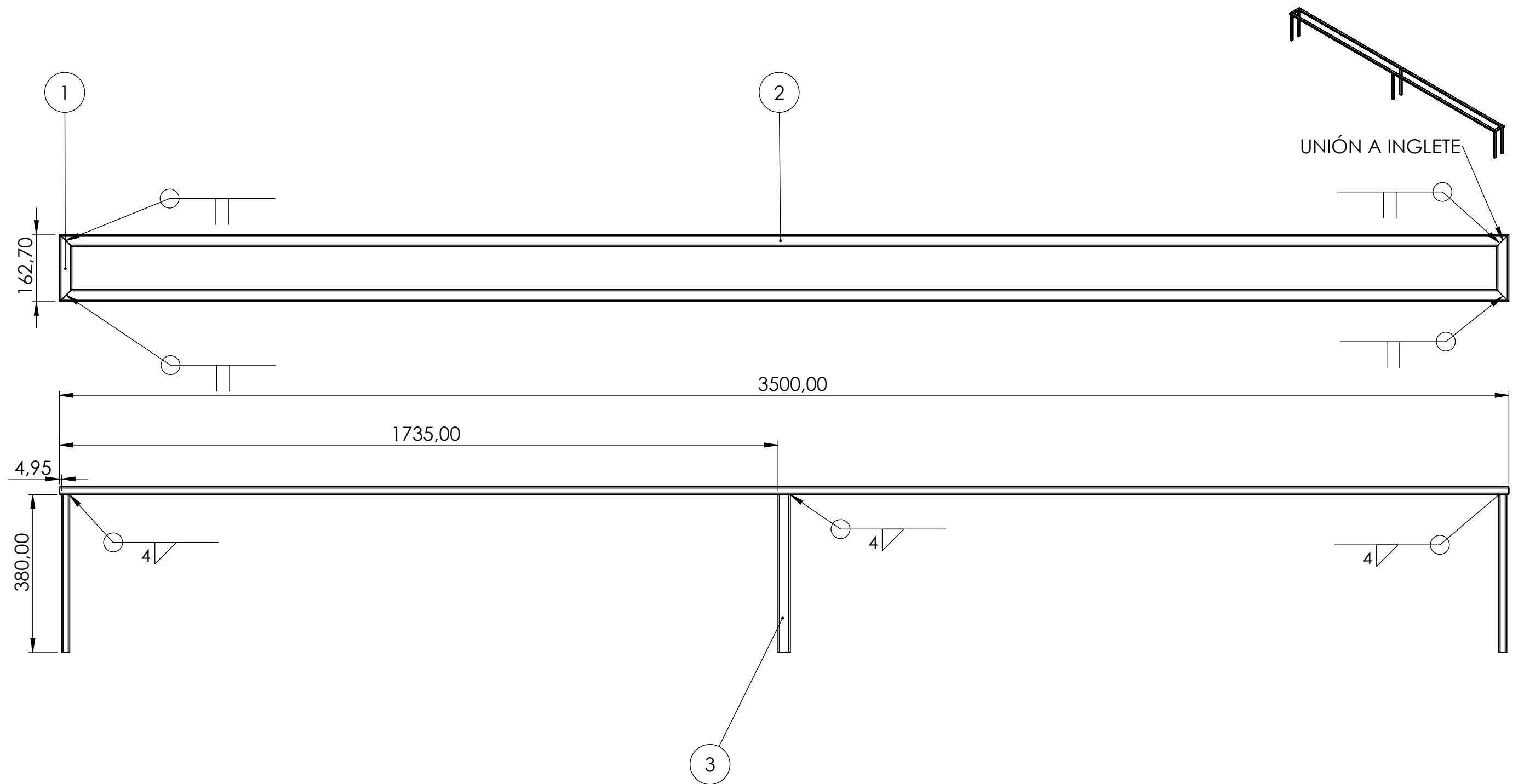


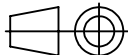
DETALLE B
ESCALA 1 : 2

NOTA: LUEGO DE SOLDAR PINTAR LA TINA (INCLUYENDO EL PLEGADO SOPORTE) CON PINTURA EPOXICA AZUL Y CON COLOR GRIS LA BASE

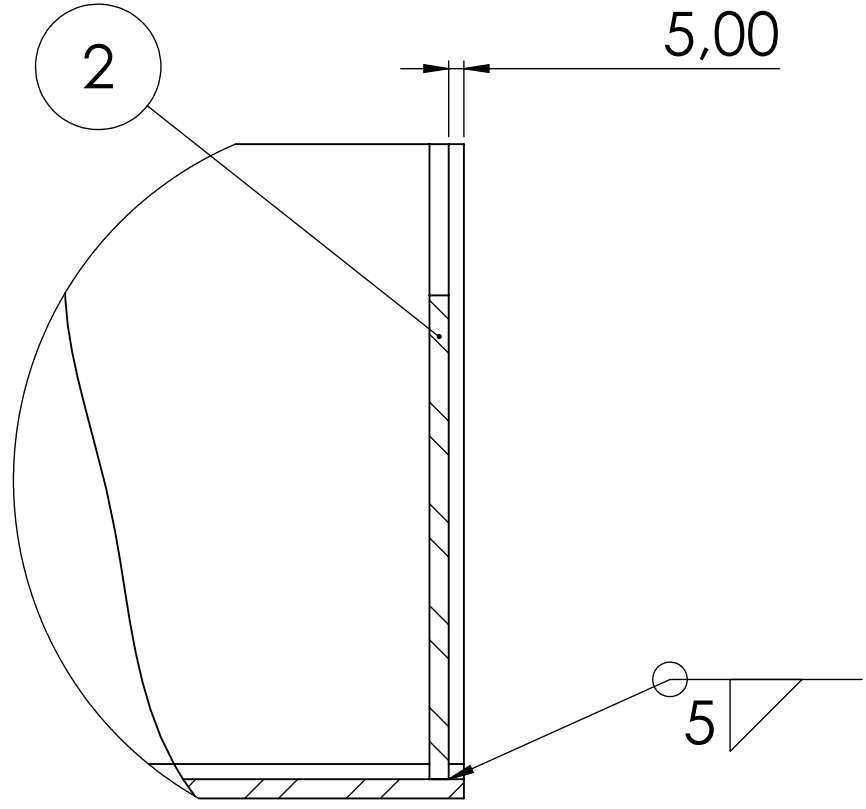
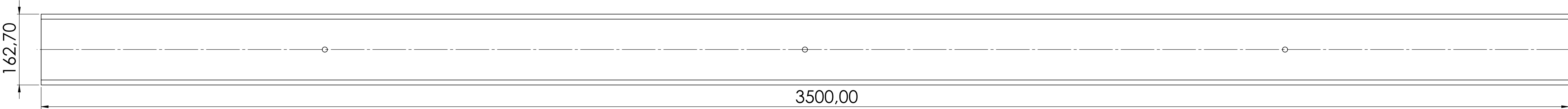
4	PLEGADO SOPORTE		3	02.01.03
3	MEDIA CUPLA 1/2"	COMERCIAL	3	-
2	CONJUNTO SOLADO TINA	SAE 1010	1	02.01.02
1	CONJUNTO SOLDADO BASE	SAE 1010	1	02.01.01
POS.	DENOMINACION	MATERIAL	CANT.	PLANO
 PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ESCUELA INGENIERIA MECANICA-UNR		02.01.00 CONJUNTO SOLDADO		
DIBUJO	FECHA 17/09/2023	NOMBRE VELOZO, M. SABESINSKY, L.	ESCALAS 1:10	 PROYECTO FINAL "DISEÑO DE CABEZAL Y POST PROCESO DE EXTRUSIÓN..."
APROBO				

TOLERANCIAS NO ACOTADAS SEGUN NORMA DIN 2768 CALIDAD MEDIA

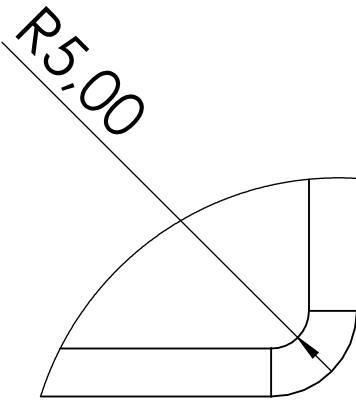


3	CAÑO REC- 20x30x2x380		COMERCIAL	6	-
2	CAÑO REC- 20x30x2x3500		COMERCIAL	2	-
1	CAÑO REC- 20x30x2x162.70		COMERCIAL	2	-
POS.	DENOMINACION		MATERIAL	CANT.	PLANO
 PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ESCUELA INGENIERIA MECANICA-UNR			02.01.01 CONJUNTO SOLDADO BASE		
	FECHA	NOMBRE	ESCALAS		 PROYECTO FINAL "DISEÑO DE CABEZAL Y POST PROCESO DE EXTRUSIÓN..."
DIBUJO	17/09/2023	VELOZO, M.	1:10		
APROBO		SABESINSKY, L.			

TOLERANCIAS NO ACOTADAS SEGUN NORMA DIN 2768 CALIDAD MEDIA



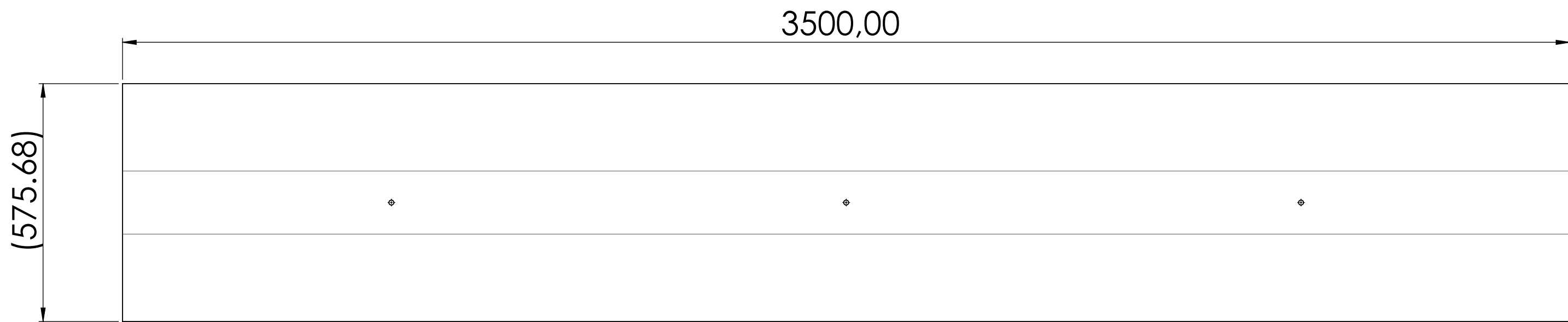
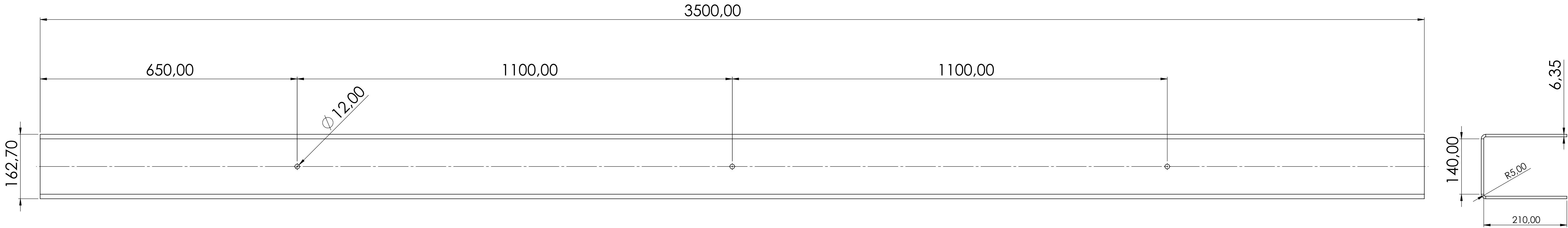
DETALLE A
ESCALA 2 : 5



DETALLE B
ESCALA 1 : 1

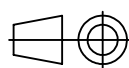
TOLERANCIAS NO ACOTADAS SEGUN NORMA DIN 2768 CALIDAD MEDIA

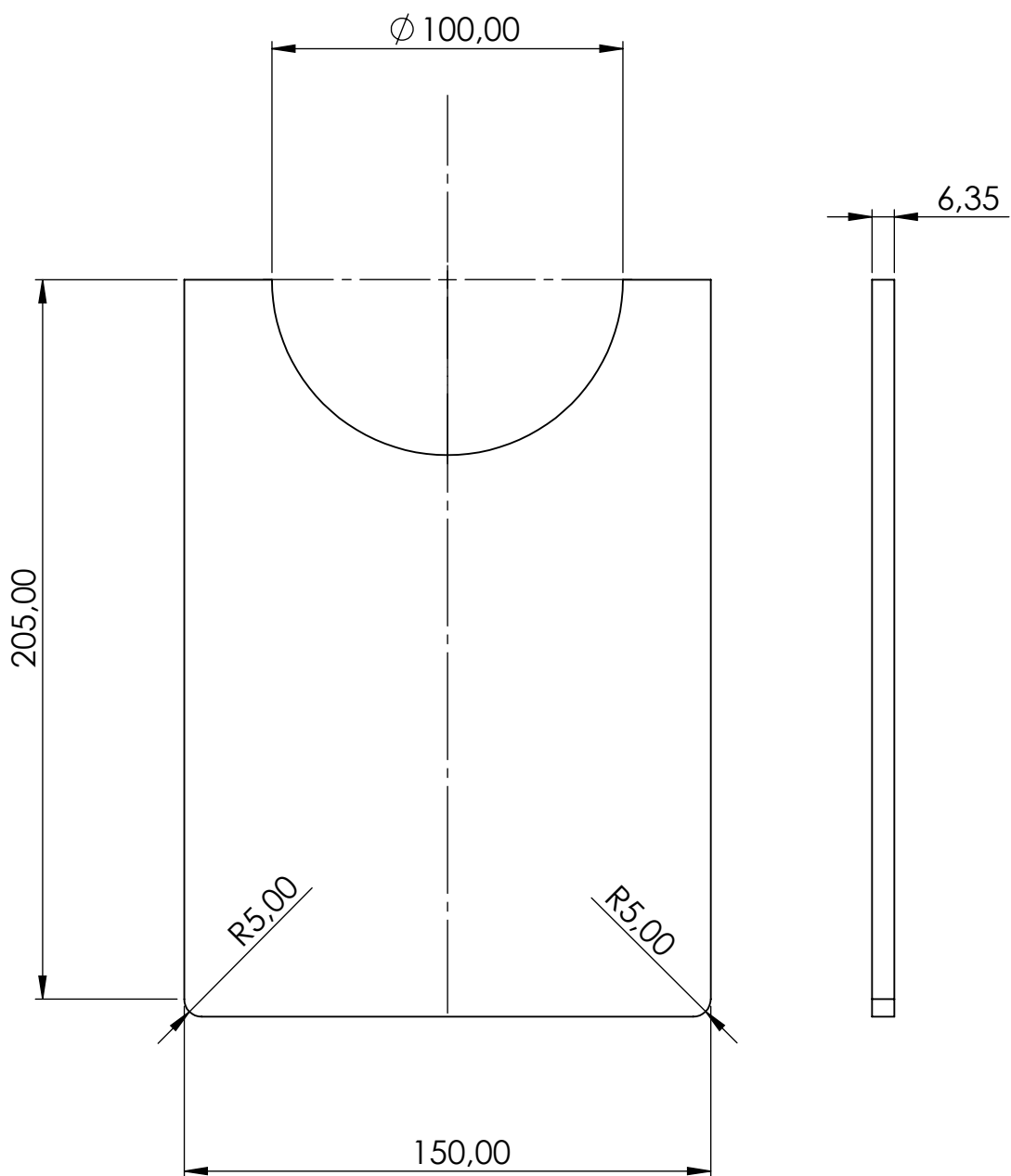
2	LATERAL TINA	SAE 1010	2	02.01.02b
1	PLEGADO TINA	SAE 1010	1	02.01.02a
POS.	DENOMINACION	MATERIAL	CANT.	N°PLANO
 PROYECTO FINAL DE INGENIERIA MECANICA ESCUELA INGENIERIA MECANICA-UNR		02.01.02 CONJUNTO SOLDADO TINA		
DIBUJO	FECHA	NOMBRE	ESCALAS	
APROBO	17/09/2023	VELOZO, M. SABESINSKY, L	1: 5	
			PROYECTO FINAL "DISEÑO DE CABEZAL Y POST PROCESO DE EXTRUSIÓN."	



DESARROLLO
ESC: 1:10

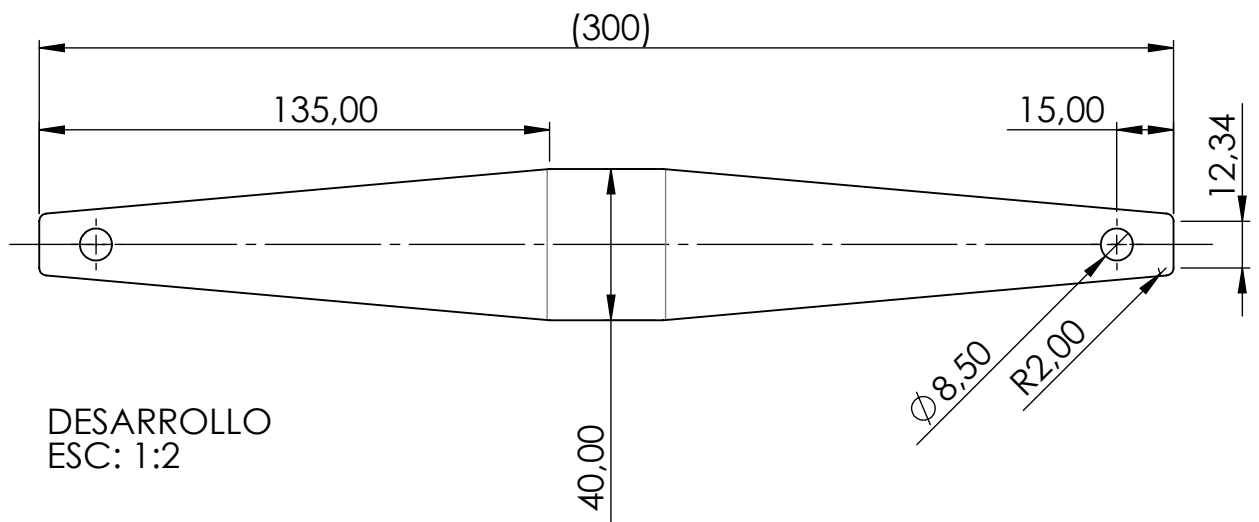
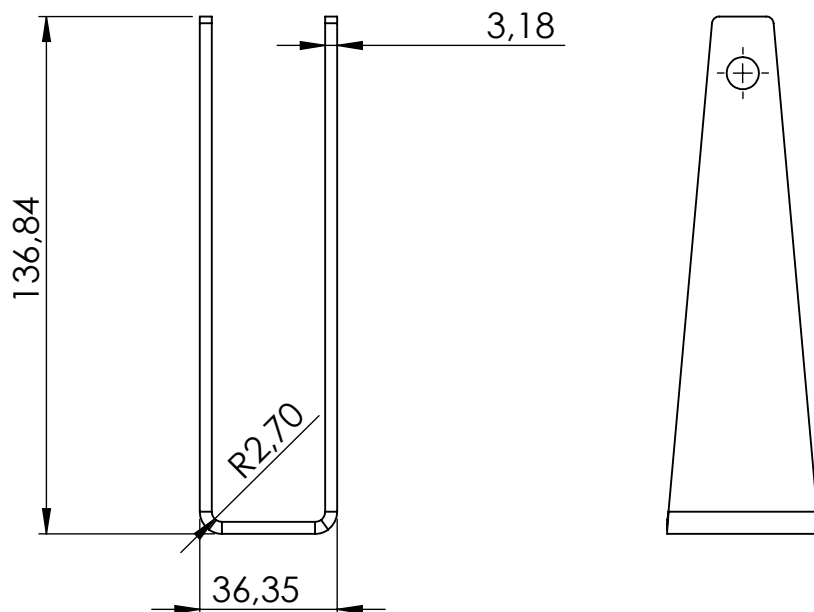
TOLERANCIAS NO ACOTADAS SEGUN NORMA DIN 2768 CALIDAD MEDIA

1	CHAPA 1/4"		SAE 1010		VER DES.	02.01.02a
POS.	DENOMINACION		MATERIAL		CANT.	PLANO
 PROYECTO FINAL DE INGENIERIA MECANICA ESCUELA INGENIERIA MECANICA-UNR			PLEGADO TINA			
DIBUJO APROBO		FECHA 17/09/2023 NOMBRE VELOZO, M. SABESINSKY, L	ESCALAS 1: 5	 PROYECTO FINAL "DISEÑO DE CABEZAL Y POST PROCESO DE EXTRUSIÓN.."		



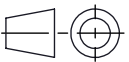
TOLERANCIAS NO ACOTADAS SEGUN NORMA DIN 2768 CALIDAD MEDIA

1	CHAPA 1/4"	SAE 1010	1	02.01.02b
POS.	DENOMINACION	MATERIAL	CANT.	PLANO
 PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ESCUELA INGENIERIA MECANICA-UNR		LATERAL TINA		
	FECHA	NOMBRE	ESCALAS	
DIBUJO	17/09/2023	VELOZO, M.	1:2	
APROBO		SABESINSKY, L.	 PROYECTO FINAL "DISEÑO DE CABEZAL Y POST PROCESO DE EXTRUSIÓN..."	

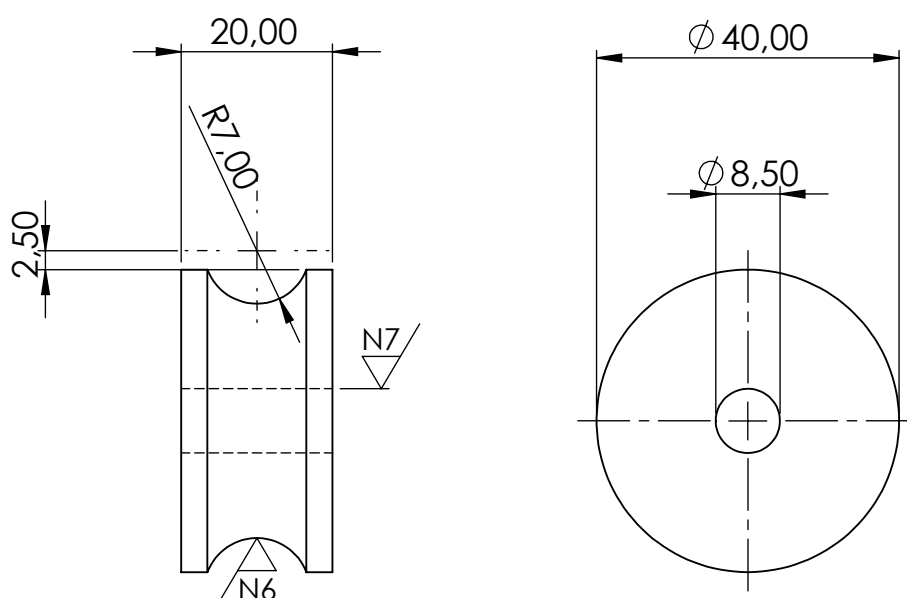


DESARROLLO
ESC: 1:2

TOLERANCIAS NO ACOTADAS SEGUN NORMA DIN 2768 CALIDAD MEDIA

1	CHAPA 1/8 "	SAE 1010	300 mm	02.01.03
POS.	DENOMINACION	MATERIAL	CANT.	PLANO
 PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ESCUOLA INGENIERIA MECANICA-UNR		PLEGADO SOPORTE		
	FECHA	NOMBRE	ESCALAS	
DIBUJO	17/09/2023	VELOZO, M.	1:2	
APROBO		SABESINSKY, L.	 PROYECTO FINAL "DISEÑO DE CABEZAL Y POST PROCESO DE EXTRUSIÓN..."	

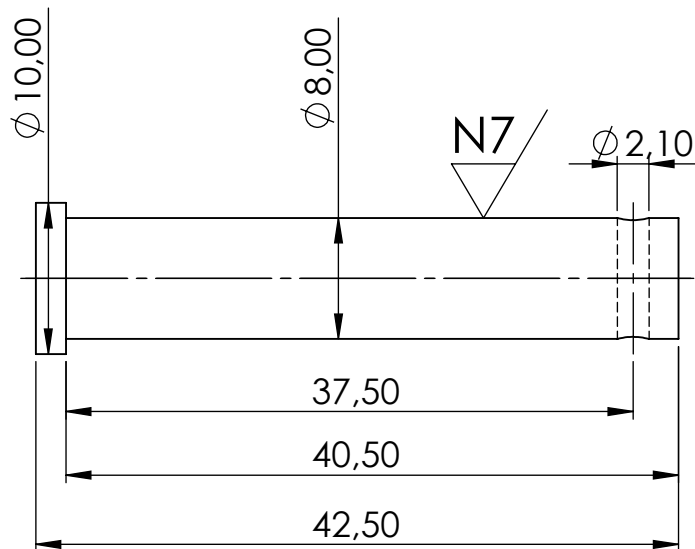
(∇ ^{N6}) (∇ ^{N7}) ∇ ^{N9}



TOLERANCIAS NO ACOTADAS SEGUN NORMA DIN 2768 CALIDAD MEDIA

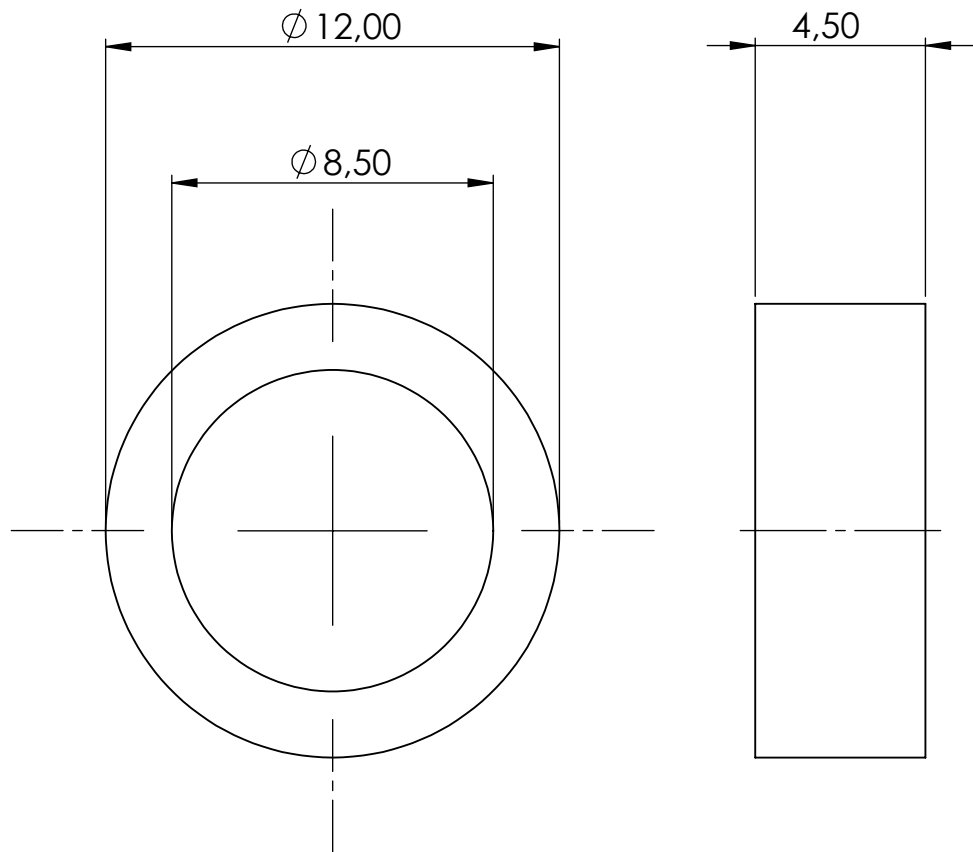
1	BARRA $\varnothing$ 40 mm	UHMW	20 mm	02.02.00
POS.	DENOMINACION	MATERIAL	CANT.	PLANO
 PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ESCUELA INGENIERIA MECANICA-UNR		SOPORTE		
	FECHA	NOMBRE	ESCALAS	
DIBUJO	17/09/2023	VELOZO, M.	1:1	
APROBO		SABESINSKY, L.	 PROYECTO FINAL "DISEÑO DE CABEZAL Y POST PROCESO DE EXTRUSIÓN..."	

($\frac{N7}{\nabla}$) $\frac{N9}{\nabla}$



TOLERANCIAS NO ACOTADAS SEGUN NORMA DIN 2768 CALIDAD MEDIA

1	BARRA $\varnothing$ 10mm		AISI 304	43 mm	02.03.00
POS.	DENOMINACION		MATERIAL	CANT.	PLANO
 PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ESCUELA INGENIERIA MECANICA-UNR			EJE		
	FECHA	NOMBRE	ESCALAS		
DIBUJO	17/09/2023	VELOZO, M.	2:1		
APROBO		SABESINSKY, L.	 PROYECTO FINAL "DISEÑO DE CABEZAL Y POST PROCESO DE EXTRUSIÓN..."		



TOLERANCIAS NO ACOTADAS SEGUN NORMA DIN 2768 CALIDAD MEDIA

1	BARRA Ø 12 mm	UHMW	4.50 mm	02.04.00
POS.	DENOMINACION	MATERIAL	CANT.	PLANO
 PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ESCUELA INGENIERIA MECANICA-UNR		TOPE		
	FECHA	NOMBRE	ESCALAS	
DIBUJO	17/09/2023	VELOZO, M.	2:1	
APROBO		SABESINSKY, L.		
				PROYECTO FINAL "DISEÑO DE CABEZAL Y POST PROCESO DE EXTRUSIÓN..."

TRATAMIENTOS TÉRMICOS A REALIZAR:

PARA PIEZAS CON MATERIAL 1.2083 (X40Cr15)

- PREVIO AL MECANIZADO:

. **RECOCIDO BLANDO:** Proteger el acero y calentar a una temperatura de entre 840 - 890 °C y mantener mínimo por 2 horas para luego enfriar de 10-20 °C/h hasta 600 °C, luego enfriar libremente en aire.

- POSTERIOR AL MECANIZADO:

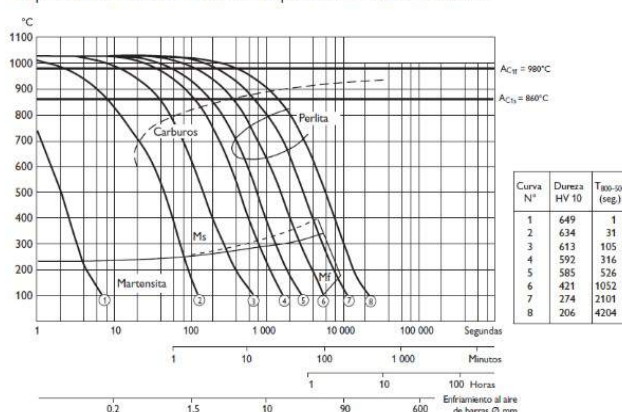
. **RECOCIDO DE ELIMINACIÓN DE TENSIONES:** Calentar a aprox 650°C uniformemente. Mantener durante 2 horas para posteriormente enfriar lento a 500°C (en horno) y luego libremente en aire

. **TEMPLE Y REVENIDO:** previo al temple se recomienda comenzar con una protección contra descarburación y oxidación durante toda la etapa del proceso. Luego, precalentar entre 650 y 850 °C. Una vez precalentado el material, aumentar la temperatura al rango de austenización del acero, que ronda entre los 1020 a 1050 °C. El tiempo de mantenimiento a temperatura de austenización depende del grado de dureza que se desee obtener. Se recomienda un tiempo de 30 minutos para obtener, luego del revenido, una dureza de entre 52 - 56 HRC. Tasa de enfriamiento de 800-850 °C/s.

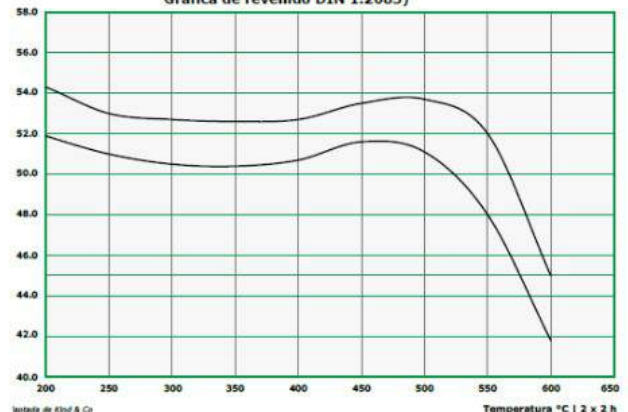
Revenir inmediato al temple, con un calentamiento lento a 100 - 200 °C. Se proponen temperaturas de 200°C. Mantener en horno 1 hora por cada 20 mm de espesor de la pieza, pero al menos por 2 horas, seguido de un enfriamiento al aire.

GRÁFICO CCT

Temperatura de austenización 1030°C. Tiempo de mantenimiento 30 minutos.



Gráfica de revenido DIN 1.2083)



Observaciones:

Revenir por arriba de 350°C, puede inducir en una pérdida de resistencia a la oxidación.



**PROYECTO FINAL
DE INGENIERÍA MECÁNICA**
ESCUELA INGENIERIA MECANICA-UNR

**03.00.00
TRATAMIENTOS TÉRMICOS**

DIBUJO	FECHA	NOMBRE	ESCALAS		PROYECTO FINAL
APROBO	20/09/23	VELOZO, M. SABESINSKY, L.	:		"DISEÑO DE CABEZAL Y POST PROCESO DE EXTRUSIÓN..."