



Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga



**“Diseño y Manufactura de un Husillo para una Máquina
Extrusora Horizontal de Plásticos: Metrología y Caracterización
de Materiales”**

TITULACIÓN INTEGRAL
TESIS

Para Obtener el Grado de:
Ingeniero Industrial

PRESENTA:
Alan Antonio Salas González

TUTORES:
Dr. José Alonso Dena Aguilar
M. en C. Víctor Manuel Velasco Gallardo

Pabellón de Arteaga, Ags., agosto del 2023



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PABELLÓN DE ARTEAGA
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS

Tesis:

**“DISEÑO Y MANUFACTURA DE UN HUSILLO PARA UNA MÁQUINA
EXTRUSORA HORIZONTAL DE PLÁSTICOS: METROLOGÍA Y
CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES”**

Presenta:

Alan Antonio Salas González

Dirigida por:

Dr. José Alonso Dena Aguilar

M. en C. Víctor Manuel Velasco Gallardo

Sinodal:

MML. Alejandro Puga Vargas

Pabellón de Arteaga, Ags., agosto del 2023

AGRADECIMIENTOS

Quiero aprovechar esta oportunidad para expresar mi gratitud más profunda a las personas que han dejado una huella imborrable en mi vida. Sus contribuciones y apoyo han sido invaluable, y estoy enormemente agradecido por todo lo que han hecho por mí.

En primer lugar, quiero agradecer a mis amados Padres. Su amor incondicional, dedicación y sacrificio han sido el motor que me impulsa a seguir adelante en cada desafío que se me presenta. Su constante apoyo emocional y su confianza en mí me han dado la fuerza para enfrentar cualquier obstáculo en mi camino. Agradezco profundamente su guía, sus valores y la importancia que han dado a mi educación y crecimiento personal.

Asimismo, quiero expresar mi agradecimiento a mis queridos hermanos y hermanas. Su presencia en mi vida ha sido un regalo invaluable. A lo largo de los años, han sido mi respaldo incondicional, brindándome consejos, escuchándome y celebrando mis logros. Agradezco sinceramente su apoyo y por ser mi fuente constante de inspiración.

También quiero reconocer y agradecer a los docentes que han dejado una marca significativa en mi camino educativo. Su pasión por enseñar, su dedicación y su capacidad para motivarme y desafiarme han sido fundamentales en mi aprendizaje y crecimiento académico. Agradezco su paciencia al responder mis preguntas y su compromiso con mi desarrollo intelectual.

Un agradecimiento especial merece el Dr. Dena, su apoyo generoso, sus acciones y oportunidades, que me ha brindado este último año su apoyo, han tenido un impacto significativo en mi desarrollo personal y profesional. Estoy sinceramente agradecido por su confianza en mí y por el impacto positivo que ha tenido en mi vida.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecer a mis amigos. Su apoyo constante, sus palabras de aliento y su presencia en los momentos más difíciles han sido un regalo invaluable. Han sido mis compañeros de aventuras, mis confidentes y mis pilares de fuerza. Agradezco de todo corazón su amistad y su capacidad para alegrar mi vida.

Pabellón de Arteaga, Ags.,

23/junio/2023

M. en C. VÍCTOR MANUEL VELASCO GALLARDO
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS

PRESENTE

Por medio del presente doy el visto bueno a la Tesis de Licenciatura titulada **“DISEÑO Y MANUFACTURA DE UN HUSILLO PARA UNA MÁQUINA EXTRUSORA HORIZONTAL DE PLÁSTICOS: METROLOGÍA Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES”** del estudiante **ALAN ANTONIO SALAS GONZÁLEZ** con numero de control 171050272 de la carrera de Ingeniería Industrial. Dicho trabajo ya fue revisado por cada uno de los miembros del comité tutorial y el estudiante ya realizo los cambios sugeridos, por lo que autorizamos su impresión.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Tierra Siempre fértil®



DR. JOSÉ ALONSO DENA AGUILAR
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL



M. en C. VÍCTOR MANUEL VELASCO
GALLARDO
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL



MML. ALEJANDRO PUGA VARGAS
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL

Pabellón de Arteaga, Ags.,

26/junio/2023

ALAN ANTONIO SALAS GONZÁLEZ
ESTUDIANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
NO. DE CONTROL 171050272

PRESENTE

Por medio de este conducto me permito comunicar a Usted que habiendo recibido los votos aprobatorios de los revisores de su trabajo de Tesis titulado: **"DISEÑO Y MANUFACTURA DE UN HUSILLO PARA UNA MÁQUINA EXTRUSORA HORIZONTAL DE PLÁSTICOS: METROLOGÍA Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES"**, hago de su conocimiento que puede imprimir dicho documento y continuar con los trámites para la presentación de su acto protocolario de titulación integral por Tesis.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

Excellencia en Educación Tecnológica®
Tierra Siempre fértil®

M. en C. VÍCTOR MANUEL VELASCO GALLARDO
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS



RESUMEN

“DISEÑO Y MANUFACTURA DE UN HUSILLO PARA UNA MÁQUINA EXTRUSORA HORIZONTAL DE PLÁSTICOS: METROLOGÍA Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES”

Por: **ALAN ANTONIO SALAS GONZÁLEZ**

El proceso de extrusión permite transformar los plásticos en nuevos productos mediante operaciones unitarias de fundición y moldeo bajo los efectos de altas temperaturas y un flujo constante de presión y fuerza. Para lo anterior se emplean máquinas extrusoras horizontales o verticales. En particular, las máquinas extrusoras horizontales utilizan un husillo albergado dentro de un barril de extrusión, siendo el husillo el elemento esencial de estos equipos. El husillo es un tornillo sin fin de Arquímedes, el cual contiene una cuerda helicoidal con alabes que sirven para cortar y empujar el material plástico fundido. El husillo es calentado y girado para provocar una fuerza de empuje del material fundido y hacerlo pasar por una boca de extrusión para que adopte una nueva geometría preestablecida.

En el Laboratorio de Conversión de la Energía, adscrito al programa de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica del Tecnológico Nacional de México campus Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga, en colaboración con el Centro de Investigaciones en Óptica, A. C. Unidad Aguascalientes, se lleva a cabo el diseño y construcción de una máquina extrusora horizontal de tornillo simple para el reciclaje de plásticos de desecho.

En este trabajo, se presenta el diseño y manufactura de un husillo para una máquina extrusora horizontal prefabricada. El husillo fue diseñado y manufacturado a partir de una barra de acero 4140T de 1500 mm de largo y 50 mm de diámetro (diámetro actualizado a 48.5 mm después de un primer desbaste para ajustarlo y embonarlo al diámetro interno del barril). Tomando como base las medidas anteriores, el diseño del husillo fue elaborado inicialmente mediante modelos matemáticos para contar con parámetros de referencia iniciales para posteriormente emplear el software de diseño mecánico CAD 3D SolidWorks[®], razón por la que se presenta una diferencia entre las mediciones de ambas metodologías. La manufactura se realizó en una empresa externa especializada, siendo participe en la puesta en operación del trabajo de torneado, sin embargo, por las condiciones de operación del torno manual de trabajo empleado, no fue posible respetar las dimensiones del diseño CAD 3D para la manufactura, por lo que, también se presenta una diferencia entre las mediciones de ambas metodologías.

La manufactura final del husillo es de 1500 mm de largo con 1200 mm de cuerda y 300 mm de cuello (*spline*). Diámetro externo de 47 mm, monocapa (alimentación, compresión, dosificación), roscado de tipo ACME con un paso de rosca de 2 hilos por pulgada.

Ingeniería Industrial

Diseño y manufactura de un husillo para una máquina extrusora horizontal de plásticos: metrología y caracterización de materiales

Adicionalmente, se realiza un estudio simple de metrología basada en la toma de medidas bajo modelos matemáticos, el diseño CAD 3D y el husillo manufacturado. El porcentaje de diferencia entre las mediciones es determinado a manera comparativa.

Así mismo, se realiza una caracterización de los materiales empleados para la manufactura del husillo de manera documental debido a la falta de disponibilidad de una máquina universal de ensayos mecánicos.

La presente Tesis es una secuencia más extensiva y metódica de un proyecto de residencia profesional realizado previamente y es parte del proyecto de Tesis de Maestría: “manufactura de una máquina extrusora horizontal con energía solar integrada a través de un sistema automático de concentración solar de canal parabólico”.

El presente trabajo es producto de los proyectos:

- (1) Proyecto “Estancias Posdoctorales por México, modalidad 1, proyecto ID 1086950 y 270828;
- (2) Programa PRODEP mediante el Fortalecimiento de CAs, ITPA-CA-1, proyecto “Diseño, implementación y control de sistemas mecatrónicos de registro y monitoreo de variables de operación en prototipos de aplicación en la industria del reciclaje de plásticos: trituración, extrusión y pirolisis”;
- (3) Proyecto TecNM clave 9433.20-P., y;
- (4) proyecto IDSCEA IA-025-2019.

Dirigido por:

Dr. José Alonso Dena Aguilar

M. en C. Víctor Manuel Velasco Gallardo

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Justificación.....	3
1.4 Hipótesis.....	3
1.5 Alcances y limitaciones.....	4
II. MARCO TEÓRICO	5
2.1 Contaminación y recicle de plásticos.....	5
2.2 Extrusión de plásticos.....	6
2.3 Máquinas extrusoras.....	7
2.4 Husillos de extrusión.....	10
2.5 Metrología.....	12
2.6 Caracterización mecánica de materiales.....	14
III. METODOLOGÍA	16
3.1 Diseños mecánicos CAD 3D.....	16
3.2 Técnicas y equipos de manufactura empleados.....	16
3.3 Modelos matemáticos del diseño del husillo.....	21
3.4 Pruebas de metrología en el husillo.....	23
3.5 Pruebas de caracterización mecánica del husillo.....	23
3.6 Pruebas de integración del husillo a la extrusora.....	23
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
4.1 Diseños CAD 3D.....	25
4.2 Manufactura del husillo.....	28
4.3 Pruebas de rotación del husillo.....	33
4.4 Pruebas de metrología en el husillo.....	34
4.5 Caracterización del material de construcción del husillo.....	36

Ingeniería Industrial

Diseño y manufactura de un husillo para una máquina extrusora horizontal de plásticos: metrología y caracterización de materiales

	Pág.
V. CONCLUSIONES.....	37
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
1 Contaminación por plástico.....	5
2 Fabricación de plásticos por extrusión.....	6
3 Extrusión de tubos plásticos.....	7
4 Extrusión de doble husillo.....	7
5 Esquema de una máquina extrusora.....	8
6 Máquina extrusora de rodillos.....	9
7 Proceso genérico de funcionamiento de una máquina extrusora.....	9
8 Tipos de husillos.....	10
9 Zonas de trabajo de un husillo convencional.....	11
10 Análisis de las propiedades de trabajo de un husillo.....	11
11 Parámetros de operación de un husillo.....	12
12 Vernier.....	13
13 Determinación de indicadores de características resistentes.....	15
14 Máquina universal de ensayos.....	15
15 Diseño final del husillo.....	16
16 Torno manual marca BAOJI modelo BJ-1660GD.....	17
17 Luneta viajera, permite disminuir la vibración y evitar la elongación.....	17
18 Configuración de torno para el desbaste de materiales: (a) hoja técnica, (b) configuración manual.....	18
19 Proceso de desbaste del material a utilizar para el husillo: (a) inicial, (b) final.....	18
20 Configuración de los parámetros del torno para la generación de rosca tipo ACME.....	19
21 Inicio del desbaste para la generación de la cuerda ACME: (a) primera cuerda, (b) acabado primera cuerda.....	19
22 Finalización de la generación de la rosca tipo ACME: (a) rosca concluida, (b) acercamiento..	20
23 Lijado del husillo con el fin de eliminar filos: (a) lijado, (b) acercamiento.....	20
24 Husillo finalizado.....	21
25 Esquema de identificación de las partes que componen la rosca tipo ACME.....	21
26 Dimensiones teóricas obtenidas mediante modelación matemática de los parámetros del diseño del husillo propuesto.....	23
27 Sistema de empuje mecánico de la extrusora.....	24
28 Sistema de mando eléctrico de la extrusora.....	24
29 Vista de la punta del husillo.....	25

Ingeniería Industrial

Diseño y manufactura de un husillo para una máquina extrusora horizontal de plásticos: metrología y caracterización de materiales

	Pág.
30 Vista del cuello del husillo.....	25
31 Área de desahogo del husillo.....	26
32 Dimensiones teóricas obtenidas mediante simulación en SolidWorks® de los parámetros del diseño del husillo propuesto.....	26
33 Parte extrema trasera de husillo y sus dimensiones.....	27
34 Torneado inicial de husillo para ajuste al barril (maquinado previo al de formación de alabes). Actividad realizada dentro de ITPA. Disminución de diámetro de 50 a 48.5 mm.....	28
35 Colocación del cilindro en el torno, para comenzar su desbaste.....	28
36 Desbaste del cilindro.....	29
37 Área de desahogo para evitar rupturas en el cortado.....	29
38 Primeras impresiones de la generación de la rosca ACME.....	30
39 Impresiones antes de finalizar el mecanizado del cilindro.....	30
40 Eliminación de filos en los alabes del husillo mediante lijado.....	31
41 Vista completa del husillo con alabes maquinados.....	31
42 Acercamiento de alabes maquinados (punta del husillo).....	32
43 Acercamiento de alabes maquinados (extremo del husillo adjunto al cuello).....	32
44 Cuello del husillo con ranura para comunicación con sistema de empuje.....	33
45 Velocidades de rotación del husillo obtenidos experimentalmente con el husillo integrado a la extrusora.....	33
46 Medición de longitud del husillo con flexómetro.....	34
47 Medición de dimensiones helicoidales con vernier.....	34
48 Dimensiones reales del husillo manufacturado.....	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Pág.
1	Dimensiones de los parámetros del husillo.....	35
2	Diferencia en la medición de los parámetros de ecuaciones vs manufactura.....	35
3	Diferencia en la medición de los parámetros de diseño CAD 3D vs manufactura.....	36
4	Propiedades del acero 4140.....	36

I. INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Un sistema de extrusión de plásticos permite la reutilización de envases en el sector industrial y urbano mediante la acción de la temperatura para fundir el material y mecánicamente forzar su paso a través de una boquilla de extrusión hasta obtener la forma deseada bajo un perfil preestablecido [1], [2]. Convencionalmente una máquina extrusora se compone de diversas partes: estructura de soporte, motor y caja de transmisión de empuje, tolva de alimentación, husillo, cilindro y boca extrusora [3]–[5]. En el mercado se encuentran diferentes modelos de máquinas de extrusión con 1 o 2 husillos [6] o de capacidades de producción desde 110 hasta 1000 kg/h, entre otras características técnicas [7]. Diversos estudios y sobre todo trabajos académicos de fin de grado se han presentado sobre el diseño o la construcción de máquinas extrusoras. Por mencionar algunos: el autor de [3] reporta el diseño de una máquina extrusora para la empresa Plastik de Occidente en donde considera el uso de un solo husillo de 1250 mm de largo y 50 mm de diámetro. El autor de [4] presenta un estudio del diseño de una extrusora de filamento 3D donde contempla el uso de un husillo de 190 mm de largo de 12.9 mm de diámetro. Los autores de [8] consideran el uso de un husillo de 500 mm de largo y de 38 mm de diámetro. Con respecto a los husillos, estos elementos deben soportar fuerzas de torsión, flexión y de desgaste, por lo que es recomendable que estén fabricados por aceros de cromo-molibdeno-aluminio, de cromo-níquel o de cromo-molibdeno, entre otros [4], así como deben establecerse ciertos parámetros de diseño para garantizar su correcto funcionamiento como: longitud, diámetro, relación L/D, número de paso, número de filetes, ángulo de hélice de canal y holgura [9]–[11]. En este contexto, los autores de [9] proponen el diseño de una máquina extrusora para caucho considerando una producción de 18.52 kg/h utilizando un husillo de 1200 mm de largo, 60 mm de diámetro, un paso de 60 mm, 17.66° de ángulo de la cresta y una holgura de 0.18 mm. Los autores de [10] proponen el diseño y construcción de un husillo para obtener pellets de PET de recycle con dimensiones de 50 cm de largo, 5.08 cm de diámetro, 10 filetes, paso de 3.6 cm, 17.65° de ángulo de hélice de canal y holgura de 0.01016 cm. En [11] se propone desarrollar una máquina extrusora 3D para producir 10 kg/h de filamentos termoplásticos de 1.75 y 3 mm de diámetro. El husillo que proponen cuenta con las siguientes características técnicas: 1.2 m de largo, 0.06 m de diámetro, 20 filetes, 17.6° de ángulo de hélice y paso de 0.06 m.

Por otro lado, la metrología es la ciencia de la medición y se basa en un modelo de relación lógica entre estándares, medición y cantidades conceptualizando el valor de medida de una propiedad de un objeto. Para lo anterior, la metrología se sustenta en el uso de diferentes tipos de instrumentos de medición dimensional (calibradores vernier, micrómetro, esferómetro, calibrador de altura, entre otros) [12], [13]. La metrología tiene un amplio uso en la ciencia y tecnología, como por ejemplo, en la espectroscopia de frecuencia modulada [14], en el registro de imágenes por metrología óptica [15] o en la medición de la separación energética de átomos [16], entre otros.

Con respecto a la caracterización de materiales, es una metodología que permite estudiar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de las materias primas mediante técnicas de espectroscopía, fractografía, microscopía, cromatografía, ensayos mecánicos, ensayos de corrosión y análisis térmicos [17]. En particular, la caracterización mecánica de materiales metálicos consiste en aplicar pruebas de fuerzas mecánicas de distintos tipo para comprobar las propiedades de durabilidad y resistencia del metal expresadas en medidas [18].

En este trabajo, se propone el diseño y manufactura de un husillo de extrusión para una máquina extrusora horizontal prefabricada y poder fabricar pellets de plásticos.

Ante esto, se han detectado las siguientes áreas de oportunidad:

1.- Manufactura del husillo:

- Diseño y fabricación de un husillo de extrusión.
- Integrar el husillo en una máquina extrusora horizontal prefabricada.

2.- Aplicación de técnicas de la Ingeniería Industrial para caracterizar el husillo manufacturado:

- Caracterización del husillo por metrología.
- Caracterización de los materiales empleados para la fabricación del husillo.

La propuesta de solución consistió en obtener los diseños del husillo, manufacturar el mismo y aplicar herramientas de Ingeniería Industrial.

La presente Tesis es una secuencia más extensiva y metódica de un proyecto de residencia profesional realizado previamente y es parte de un proyecto de Tesis de Maestría.

Este estudio fue soportado por (i) Proyecto “Estancias Posdoctorales por México, modalidad 1, proyecto ID 1086950 y 270828, (ii) Programa PRODEP mediante el Fortalecimiento de CAs, ITPA-CA-1, (iii) Proyecto TecNM clave 9433.20-P y (iv) proyecto INCYTEA (antes IDSCEA) IA-025-2019.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Validar el diseño y manufactura de un husillo de extrusión mediante técnicas de metrología y caracterización de materiales para su integración en una máquina extrusora horizontal.

1.2.2 Objetivos específicos

- Diseñar matemáticamente el husillo mediante modelos matemáticos para validar el funcionamiento y dimensiones del tornillo previo a su elaboración en software especializado de diseño CAD 3D.

- Diseñar mecánicamente el husillo mediante software especializado de diseño mecánico 3D CAD para validar el funcionamiento y dimensiones del tornillo previo a su manufactura.
- Manufacturar el husillo mediante técnicas de manufactura avanzada para su validación mediante técnicas de metrología y caracterización de materiales.
- Medir las características físicas del husillo manufacturado mediante técnicas de metrología para validar el diseño propuesto matemáticamente y por diseño CAD 3D.
- Analizar sus propiedades mecánicas mediante técnicas de caracterización mecánica para validar el tipo de acero propuesto.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Los plásticos de un solo uso ocasionan efectos negativos al ambiente. Dentro de los métodos de reciclaje encontramos la extrusión como una técnica capaz de otorgarles un valor agregado a los desechos plásticos al otorgarles una nueva forma para un nuevo uso por los consumidores. Una máquina extrusora, puede ser una opción para la industria del reciclaje. Por tanto, el presente estudio puede ser parte de la cadena de valor del reciclaje de plásticos de un solo uso para obtener pellets.

Se cuenta con un prototipo de una máquina extrusora horizontal de plásticos diseñada y manufacturada en trabajos previos. Sin embargo, la máquina no ha sido puesta en operación en pruebas de extrusión de plásticos debido a la falta del diseño y manufactura de un husillo de extrusión. Por lo que se ha determinado desarrollar el husillo para proceder a demás trabajos futuros faltantes.

Con base en lo anterior, en este estudio se presenta una propuesta de diseño y manufactura de un husillo para una máquina extrusora horizontal.

La presente propuesta se derivada de los proyectos de (1) convocatoria EPM 2021, modalidad 1, proyecto ID 1086950 y convocatoria EPM 2022(1) proyecto ID 270828, (2) Tesis de Maestría 2022, “manufactura de una máquina extrusora horizontal con energía solar integrada a través de un sistema automático de concentración solar de canal parabólico”, (3) Programa PRODEP mediante el Fortalecimiento de Cas 2021, ITPA-CA-1, “Diseño, implementación y control de sistemas mecatrónicos de registro y monitoreo de variables de operación en prototipos de aplicación en la industria del reciclaje de plásticos: trituración, extrusión y pirolisis”, (4) TecNM clave 9433.20-P y (5) INCYTEA (antes IDSCEA) IA-025-2019.

1.4 HIPÓTESIS

Es posible diseñar y manufacturar un husillo de extrusión con las dimensiones de alabes helicoidales y propiedades físicas suficientes para emplearse en una máquina extrusora horizontal prefabricada.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

Como alcance se tiene que:

- Se obtuvieron los diseños y se realizó la manufactura del husillo propuesto.
- La medición de las dimensiones de la configuración geométrica final del husillo se realizó empleando calibrador vernier y flexómetro.
- El husillo se logró integrar a la máquina extrusora horizontal prefabricada y se llevaron a cabo pruebas de velocidad de giro del husillo. Un tacómetro dual DT-2236 marca Lutron se empleó para la medición de las revoluciones del husillo integrado a la extrusora.

Como limitaciones se cita:

- La caracterización de materiales se centró en una caracterización mecánica. Sin embargo, por la indisponibilidad de equipos especializados de caracterización mecánica de materiales no se midieron las propiedades mecánicas del husillo. Para cumplir lo anterior, se realizó una exhaustiva investigación documental con especialistas sobre las propiedades del acero empleado para la fabricación del husillo.
- La caracterización por metrología solo se centró en la determinación del porcentaje de diferencia de las mediciones entre las metodologías de modelos matemáticos-manufactura y diseño-manufactura.
- Únicamente se realizaron pruebas preliminares experimentales del funcionamiento del husillo, expresadas en velocidades de giro (rpm).

II. MARCO TEÓRICO

2.1 CONTAMINACIÓN Y RECICLE DE PLÁSTICOS

A nivel global, los plásticos producidos por resinas vírgenes de hidrocarburos representan el 6% del consumo mundial de los combustibles fósiles, por lo que una reducción del consumo de plásticos representa una disminución al uso de estos energéticos contaminantes. Anualmente en México, se producen más de 7 millones de toneladas de plástico y donde el 48-50% corresponde a plásticos de un solo uso en forma de empaques, embalajes y envases [19], [20]. Específicamente, del total de plásticos que se fabrica, el 40% corresponde a envases de un solo uso [20]. En particular, en la Ciudad de México (Méx.) la basura plástica representa del 12 al 15% del contenido de las 13 mil toneladas de residuos que diariamente se producen en esta metrópolis. Aunado a lo anterior, solo el 6.07% de los plásticos de un solo uso se recuperan y reciclan [19].

Dentro de este contexto, la contaminación por plástico afecta (a) a los ecosistemas, donde anualmente 8 millones de toneladas de plásticos llegan a los océanos y (2) a la salud humana, ya que ciertas sustancias contenidas en los plásticos pueden afectar la reproducción reproductiva o causar cambios en la inmunidad de las personas [20].

El renovar, repensar, rechazar, reducir, reutilizar, reciclar y reparar son acciones que permiten minimizar el consumo de plástico, ya que, se puede reducir el uso innecesario de estos materiales, reutilizar el que se pueda y desechar solamente los plásticos que no pueda dárseles un segundo uso [20]. En la Figura 1, se muestra un esquema representativo de botellas de plástico de un solo uso.



Figura 1. Contaminación por plástico. Tomada de [20].

El reciclaje de plásticos se divide en métodos de tratamiento primario (implica operaciones mecánicas como la trituración), secundario (fusión de los materiales para convertirse en productos de diferentes formas), terciario (uso de técnicas químicas o térmicas) y cuaternario (incineración) [21]. En el caso del reciclaje secundario, los termoplásticos pueden fundirse y ser moldeados varias veces a través de un proceso de extrusión. Dentro de

estos plásticos se tiene el polietileno de alta y baja densidad, el polietileno de tereftalato, el propileno y poliestireno, entre otros [22]. En la Figura 2, se observa un conjunto de envases de plásticos fabricados por extrusión.



Figura 2. Fabricación de plásticos por extrusión. Fuente: [23].

2.2 EXTRUSIÓN DE PLÁSTICOS

El proceso de extrusión se emplea en las industrias de los plásticos, metales, cerámicos y de alimentos. En general, la extrusión es la transformación de un material en otro producto mediante su fundido y paso forzado a través de una boquilla de sección transversal constante, llevándose a cabo este proceso en máquinas extrusoras. El proceso de extrusión inicia con la entrada de la materia prima en forma sólida en un extremo de la máquina, dentro de ella se realiza el calentamiento del material y mediante un sistema de empuje mecánico sale por el otro extremo en forma de material fundido [1]. La extrusión es una operación sencilla, de producción continua y de alta adaptabilidad para diversos materiales. Gracias a que se mantiene una sección transversal constante, se pueden fabricar tuberías, mangueras, películas, laminas y perfiles [24]. En la Figura 3, se visualiza la extrusión de un tubo plástico en una extrusora industrial.

En la extrusión, para que el paso del plástico se lleve a cabo a través de una boquilla se emplea un tornillo calentado y girado por un ariete o empujador mecánico. Este tornillo, del tipo Arquímedes, se alberga con precisión dentro de una camisa cilíndrica. Todos estos elementos cumplen la función de recibir y almacenar el polímero, transportar el material, calentar y comprimirlo, homogeneizar, aplicar la presión necesaria y extruir el material. Por lo que, la extrusión se puede clasificar según distintas características técnicas de operación, entre ellas podemos mencionar los extrusores con husillo con venteo o co-mezcladores y los extrusores con rotación inversa o de dos husillos, entre otros [2]. En la Figura 4, se ilustra un extrusor de doble husillo.

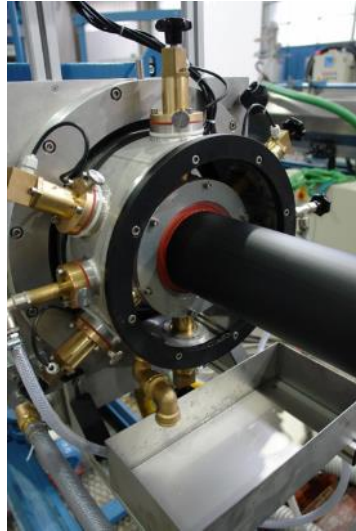


Figura 3. Extrusión de tubos plásticos. Tomada de [25].



Figura 4. Extrusión de doble husillo. Fuente: [26].

2.3 MÁQUINAS EXTRUSORAS

El proceso de extrusión de plásticos se lleva a cabo en máquinas extrusoras. Esta tecnología emplea altas temperaturas y presión para fundir el plástico, transportarlo por medio de un husillo albergado en un cilindro y hacerlo pasara por una boca extrusora. Las extrusoras se componen principalmente de una estructura de soporte, tolva de alimentación, un barril o cañón, un husillo o tornillo, un mecanismo de rotación y reducción de velocidad, una matriz o boquilla y un sistema de calentamiento por medio de resistencias eléctricas. La tolva es el depósito de entrada continua del material al extrusor. El barril es un metal cilíndrico en cuyo interior se coloca y gira el husillo donde ambos constituyen el cuerpo principal de la extrusora. El husillo es calentado y girado para impulsar y procesar el material plástico a través del extrusor. La boquilla es la pieza que da forma al material plástico en la

geometría deseada. Las resistencias eléctricas proporcionan el calor suficiente para derretir el plástico de trabajo a las temperaturas deseadas [3], [4]. En la Figura 5, se presenta un esquema convencional de una extrusora de un solo tornillo.

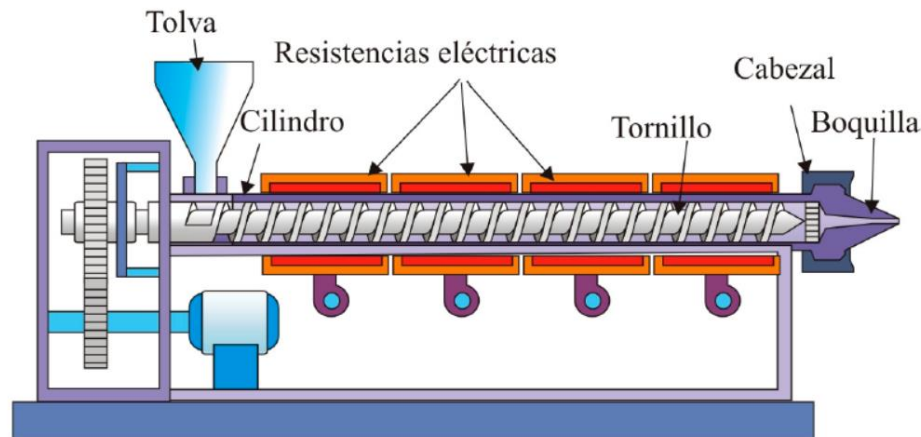


Figura 5. Esquema de una máquina extrusora. Tomada de [1].

Las máquinas extrusoras se pueden clasificar según la presión que generan o requieren para hacer pasar el material fundido por la boquilla [27]:

- Extrusoras de desplazamiento positivo: en este tipo de máquinas no se emplea un tornillo de empuje, sino que el material se coloca en una cámara (habilitada con elementos de calefacción) y es empujada por medio de un pistón o por un engranaje.
- Extrusoras de fricción viscosa: los equipos tienen un tornillo helicoidal, rodillo o tambor rotatorio para impulsar el material por la cámara y la boca extrusora. En las extrusoras de tornillo, el material se ingresa por una tolva hacia el cañón y entra en contacto con el tornillo, el cual es calentado y girado propiciando el transporte del polímero hacia el extremo de salida. En las extrusoras de tambor rotatorio el material se desplaza por gravedad y por la acción de un embolo hacia una cámara donde se hospeda el tambor y un bastidor fijo, el cual se calienta o enfría según se requiera, al final el plástico fundido se mueve a la boquilla por fuerzas tangenciales. En la Figura 6, se presenta una extrusora de rodillos y en este tipo de máquinas su funcionamiento se basa en una extrusión plana por medio de rodillos para fabricar laminas y películas.

Siendo importante resaltar que cualquier tipo de extrusora se basa en el principio de funcionamiento especificado en la Figura 7. En el transporte, el material se alimenta directamente a la extrusora o por medio de la tolva; la fusión, se realiza por conducción de calor desde las paredes calientes del barril hacia el material y por la fricción del tornillo; la dosificación, es el paso del material fundido hacia la salida; el mezclado, permite homogeneizar el material; la desgasificación, permite liberar los gases producidos durante la extrusión; y el

Ingeniería Industrial

Diseño y manufactura de un husillo para una máquina extrusora horizontal de plásticos: metrología y caracterización de materiales

conformado, se produce ya a la salida del material por la boca extrusora mediante operaciones unitarias de tensado, relajamiento y enfriamiento.



Figura 6. Máquina extrusora de rodillos. Fuente: [28].

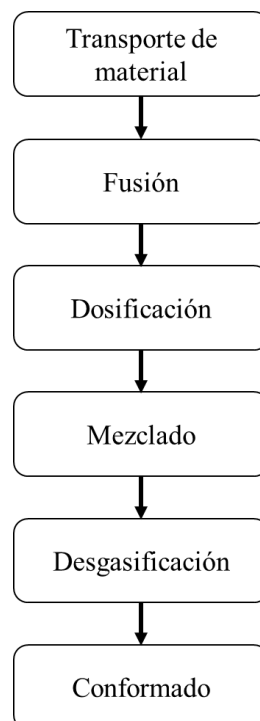


Figura 7. Proceso genérico de funcionamiento de una máquina extrusora. Fuente: [27].

2.4 HUSILLOS DE EXTRUSIÓN

El husillo es el elemento esencial de las máquinas extrusoras, se trata de un tornillo sin fin de Arquímedes con un diseño con alabes helicoidal y su labor se centra en transportar, calentar, fundir, mezclar e impulsar el material fundido por la boquilla de sección transversal constante [1], [29]–[31]. En la Figura 8, se observan distintas configuraciones de husillos de extrusión.

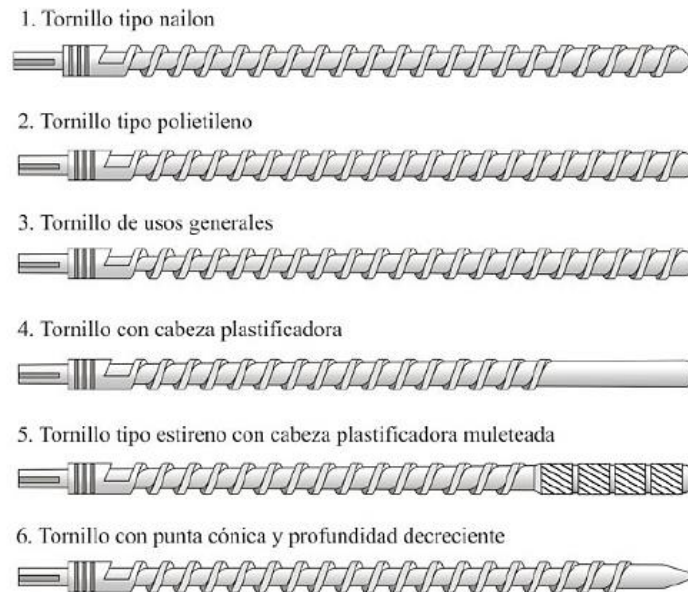


Figura 8. Tipos de husillos. Tomada de [1].

En general los husillos portan una configuración de 3 zonas [1], [29]–[31], ver Figura 9:

- **Zona de alimentación:** es la zona inicial del tornillo que recibe el material a extruir y cuenta con la mayor profundidad del diseño del husillo. Su función es la de incorporar el primer calor al material a extruir considerando el coeficiente de fricción entre el material-husillo y material-barril. Una sobrecarga de material en esta zona puede ocasionar una torsión no deseada del tornillo.
- **Zona de compresión:** también llamada de transición o plastificación. Es la zona intermedia del husillo y en donde se lleva a cabo la mayor parte de la fusión del polímero. En esta zona la profundidad del husillo es menor a la de alimentación y el volumen del material disminuye progresivamente debido a la compresión ejercida por el husillo.
- **Zona de dosificación:** es la zona final del tornillo donde se completa la fusión del polímero. Cuenta con una menor profundidad para generar mayor presión previo a su paso por la boca extrusora.

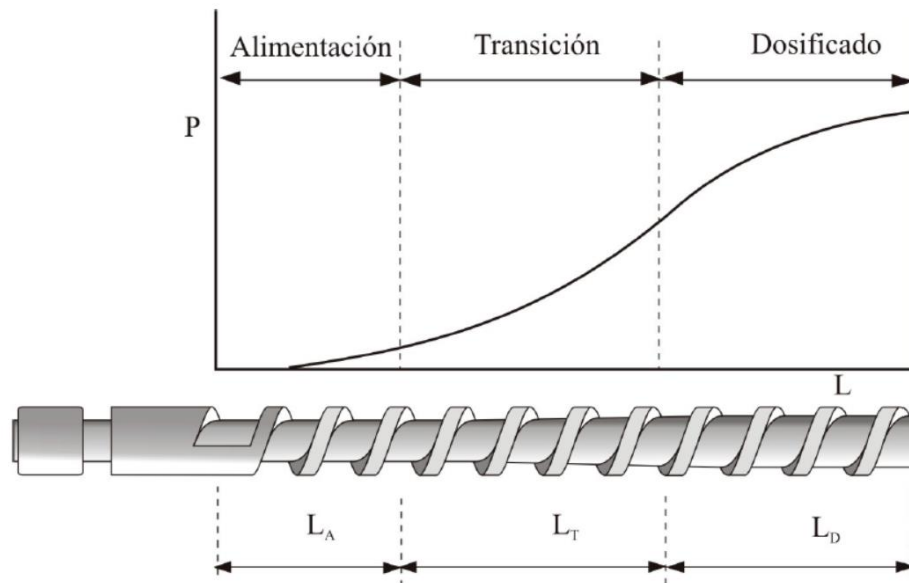


Figura 9. Zonas de trabajo de un husillo convencional. Fuente: [1].

En la Figura 10, se muestra un diagrama de los fenómenos que se presentan en el husillo. La zona color salmón representa el cuerpo central y los alabes del husillo, las áreas azules simbolizan por un extremo la presión por avance del material y por el otro lado la compresión propia del material fundido, la zona amarilla simboliza material fundido y la zona verde es una mezcla de material semi-fundido.

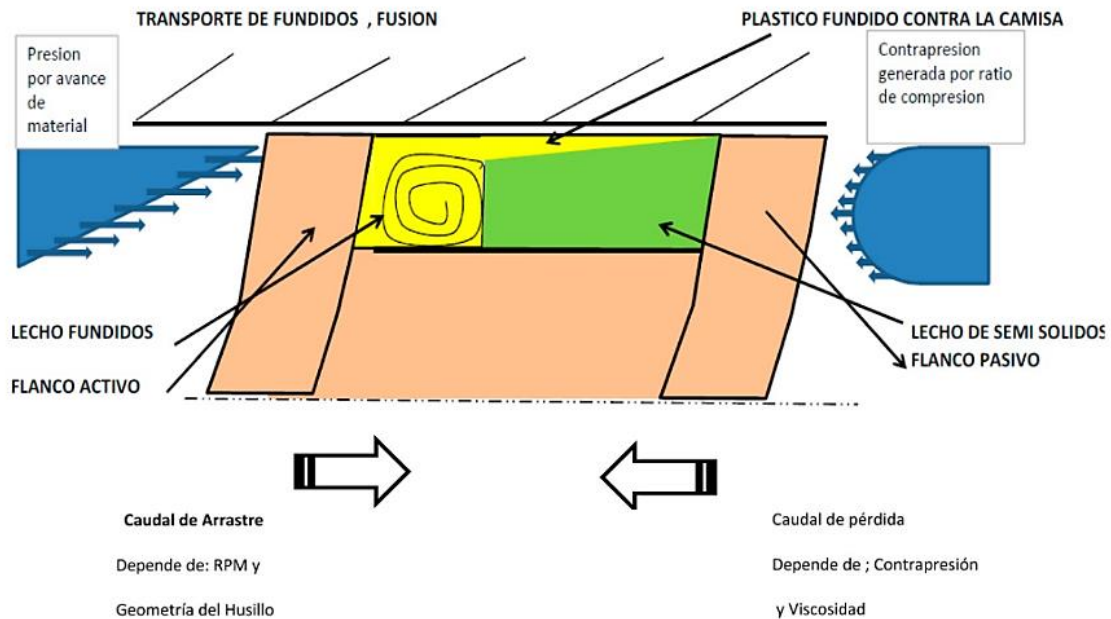


Figura 10. Análisis de las propiedades de trabajo de un husillo. Tomada de [30].

El diseño del husillo contempla la definición de ciertos parámetros de operación: longitud (L), diámetro (D), ángulo del filete (θ), paso de rosca (w), además de determinar la relación L/D y conocer el coeficiente de fricción del material-husillo y material-barril. En la Figura 11, se presentan estos parámetros.

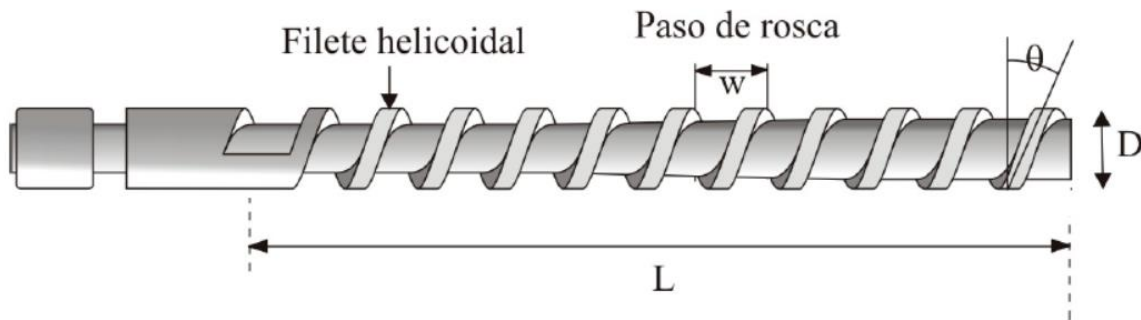


Figura 11. Parámetros de operación de un husillo. Tomada de [1].

Si bien, existen modelos matemáticos (no presentados) para definir el diseño del husillo, actualmente se emplean técnicas de diseño asistido por computadora y software especializado (SolidWorks, Autocad, ANSYS, otros) de diseño para facilitar la elaboración del tornillo previo a su manufacturación.

2.5 METROLOGÍA

La metrología es la ciencia de la medición, la cual se basa en comparar la medida de algo (unidad de medida) contra un patrón de referencia (metrología científica). Las aplicaciones de la metrología se enfocan a realizar diferentes acciones que solicitan niveles de confiabilidad de los resultados de las mediciones para identificar las incertidumbres de un objeto o producto. El error de medición es la diferencia entre el valor de la medición realizada y el valor auténtico del parámetro que se está midiendo, mientras que la incertidumbre de medición es la dispersión de los valores de las mediciones realizadas contra el valor verdadero del parámetro que se está midiendo. Siendo importante estimar la incertidumbre durante un proceso de medición. Entre estas mediciones se identifican la [12], [13]:

- Longitud.
- Masa.
- Temperatura.
- Tiempo.
- Electricidad y magnetismo.
- Fotometría y radiometría.
- Acústica y vibración.
- Radiación ionizante.

- Química.

Para llevar a cabo las mediciones, la metrología hecha mano de instrumentos de medición como [12], [13]:

- Reglas y cintas métricas.
- Calibradores, micrómetros, vernieres.
- Bloques patrón.
- Medidores de ángulos, divisores, medidores de diámetros internos y externos, medidores de redondez.
- Rugosímetros.
- Balanzas y basculas.
- Termómetros.
- Sensores y pirómetros ópticos.
- Relojes y cronómetros.
- Amperímetros y multímetros.
- Radiómetros y fotómetros.
- Micrófonos.
- Calorímetros.
- Otros.

Dentro de este contexto, el calibrador vernier o pie de rey es un instrumento de medida lineal con escalas del sistema inglés (pulgadas) y el sistema internacional (cm) empleado generalmente para medir espesores y diámetros (internos y externos) [32]. En la Figura 12, se presenta un diagrama de un vernier convencional. El flexómetro o cinta métrica es un instrumento de medición empleado para resolver mediciones de longitud (m) y puede tener escalas en el sistema internacional (cm, m) y en el sistema inglés (pulgadas) [33].

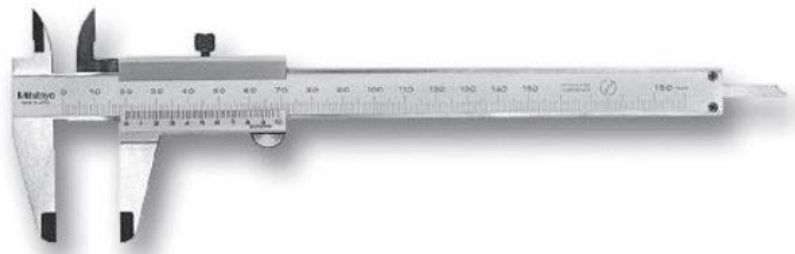


Figura 12. Vernier. Fuente: [32].

El cálculo de la diferencia porcentual es un parámetro de referencia de cuán variante es un valor respecto de otro y puede ser empleado como una forma alterna comparativa de la diferencia de error de medición entre dos mediciones. Para calcular esta diferencia se realiza el siguiente procedimiento [34]:

- Primeramente, se realiza una resta del primer valor (valor antiguo) y el segundo valor (valor nuevo),
- enseguida se divide la cifra resultante entre el primer valor y,
- a continuación, el dato final se multiplica por 100.

2.6 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIALES

Las características mecánicas de los materiales se enfocan al estudio de la capacidad de los materiales de transmitir o soportar las energías mecánicas de fuerzas y desplazamientos, por lo que se analizan los indicadores del comportamiento mecánico de los materiales, así como la constitución y estructura de la materia que los componen, ver Figura 13. De igual manera, la caracterización mecánica de materiales permite conocer como las fuerzas o desplazamientos inciden en el endurecimiento, plastificación, envejecimiento, aleación y procesos térmicos que pueden sufrir los materiales. Para determinar los índices que miden las características de respuesta de los materiales se emplean ensayos estandarizados de dimensionamiento, de valores absolutos o de valores relativos, entre los cuales se consideran ensayos [35]:

- Estáticos: tracción (resistencia a la temperatura ambiente), fluencia (resistencia a media o altas temperaturas), fractura (riesgo de aparición de fracturas relacionadas a tensiones), dureza (conocer la tracción del material).
- Dinámicos: fatiga (piezas sometidas a esfuerzos y tensiones variables) y resiliencia (demostrar la tenacidad del material).

Experimentalmente los ensayos de mecánica de materiales se llevan a cabo en máquinas universales de ensayos y en donde se utilizan probetas (muestras) del material para determinar los valores de sus variables de respuesta. Las probetas pueden tener una forma cilíndrica o planas. Por mencionar algunos ensayos que se realizan a los metales: en los ensayos de tracción se analiza la capacidad del material de alargamiento hasta su rotura, así como su capacidad de deformación/recuperación elástica; en los ensayos de ductilidad se mide la capacidad del material para ser deformado sin que se fracture; en los ensayos de compresión se determina cuanta fuerza puede resistir el material hasta fracturarse; en los ensayos de flexión se estudia la resistencia a la tracción del material; en los ensayos térmicos se analiza cuanto se puede recrystalizar un material por acción de la temperatura; en la dureza se observa la resistencia del material a ser deformado o penetrado por un objeto punzante [36].

Ingeniería Industrial

Diseño y manufactura de un husillo para una máquina extrusora horizontal de plásticos: metrología y caracterización de materiales

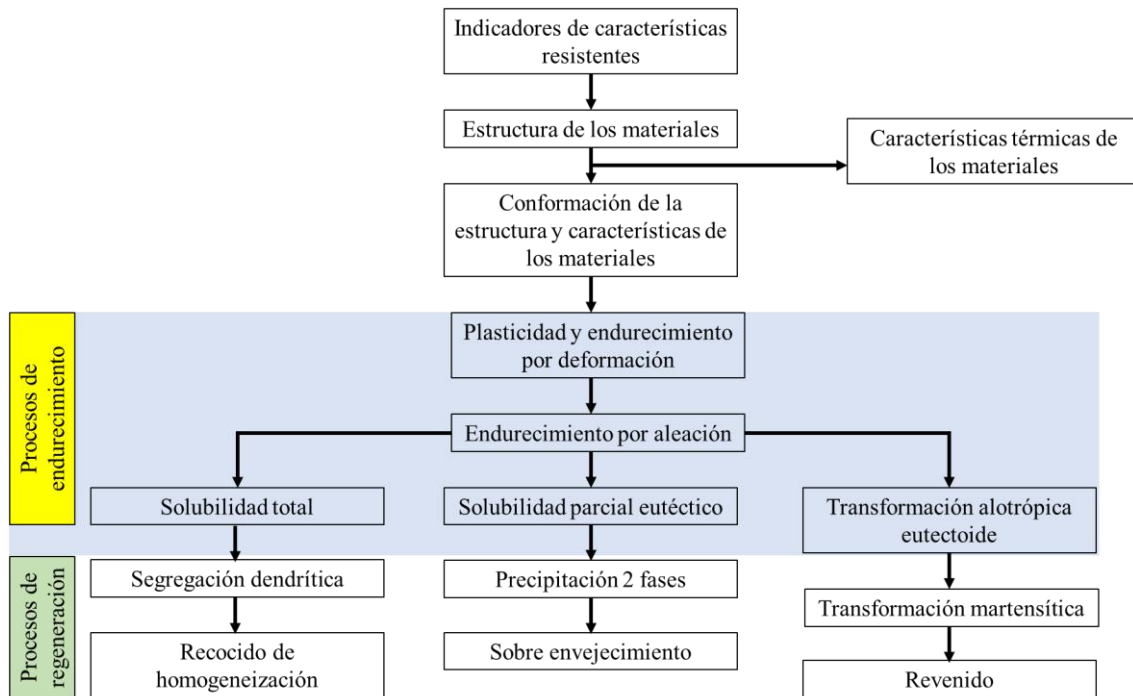


Figura 13. Determinación de indicadores de características resistentes. Tomada de [35].



Figura 14. Máquina universal de ensayos. Fuente: [36].

III. METODOLOGÍA

3.1 DISEÑOS MECÁNICOS CAD 3D

Todos los diseños mecánicos se elaboraron en el software CAD SolidWorks® 2020. Los diseños en vista isométrica, como la Figura 15, o de dibujo técnico se presentan en medidas de milímetros (mm). Por cuestiones de patentando, únicamente se presentan los diseños con dimensiones generales de largo x ancho x alto (unidades de cotas en mm).



Figura 15. Diseño final del husillo.

3.2 TÉCNICAS Y EQUIPOS DE MANUFACTURA EMPLEADOS

Después de una revisión exhaustiva en la literatura, los autores de [37] recomiendan el uso de un acero 4140 para la fabricación del husillo y acero 8630 para fabricar el barril ya que ambos aceros son compatibles para los esfuerzos de extrusión a los que son sometidos.

Por tanto, el husillo propuesto será manufacturado con acero 4140, esto debido a que la máquina extrusora prefabricada cuenta con un barril consistente de una barra redonda perforada de acero 8630 de 1200 mm de longitud, 75 mm de diámetro externo y 50 mm de diámetro interno.

El husillo propuesto consta de una barra redonda de acero 4140T de 50 mm de diámetro de 1500 mm de largo. Se considera 300 mm de cuello (área lisa) y el resto de área útil de extrusión (rosca-maquinado de alabes).

La manufactura del husillo se realizó en la empresa TITAN localizada en Blas García 112 Peñuelas el Cienegal, 20340, Aguascalientes, Ags., México (21°44'05.9" N, 102°16'30.1" W).

Para la manufactura del husillo se empleó un torno manual BAOJI modelo BJ-1660GD, ver Figura 16.

El proceso de manufactura se desarrolló bajo el siguiente procedimiento:

1. Primeramente, se realizó un desbaste inicial a lo largo de todo el husillo para eliminar imperfecciones e irregularidades superficiales en la barra del husillo. Para lo anterior, el torno fue habilitado con una luneta viajera, ver Figura 17, y se configuró el torno para un avance de desbaste lento, ver Figura 18. La luneta viajera es un accesorio de torneado que permite el trabajo en torno de piezas lineales largas ya que permite controlar la vibración y evita la elongación del material. En la Figura 19, se observa el proceso de desbaste.

Ingeniería Industrial

Diseño y manufactura de un husillo para una máquina extrusora horizontal de plásticos: metrología y caracterización de materiales

2. Concluido el desbaste, se reconfigura el torno para comenzar la elaboración de la rosca tipo ACME bajo un avance de 2 hilos/pulgada, ver Figura 20. En la Figura 21, se muestra una primer pasada de torneado de cuerda.
3. Después de alrededor de 12 horas de trabajo, se logro el acabado del husillo, ver Figura 22. Finalmente, se realiza un acabado final mediante un lijado manual en el área de la cresta del husillo para disminuir el filo de los alabes, ver Figura 23. En la Figura 24, se muestra el acabado final del husillo inmediatamente de concluido su manufactura (diámetro exterior final de 49 mm – con maquinado de álabes y filetes).



Figura 16. Torno manual marca BAOJI modelo BJ-1660GD.



Figura 17. Luneta viajera, permite disminuir la vibración y evitar la elongación.

Ingeniería Industrial

Diseño y manufactura de un husillo para una máquina extrusora horizontal de plásticos: metrología y caracterización de materiales

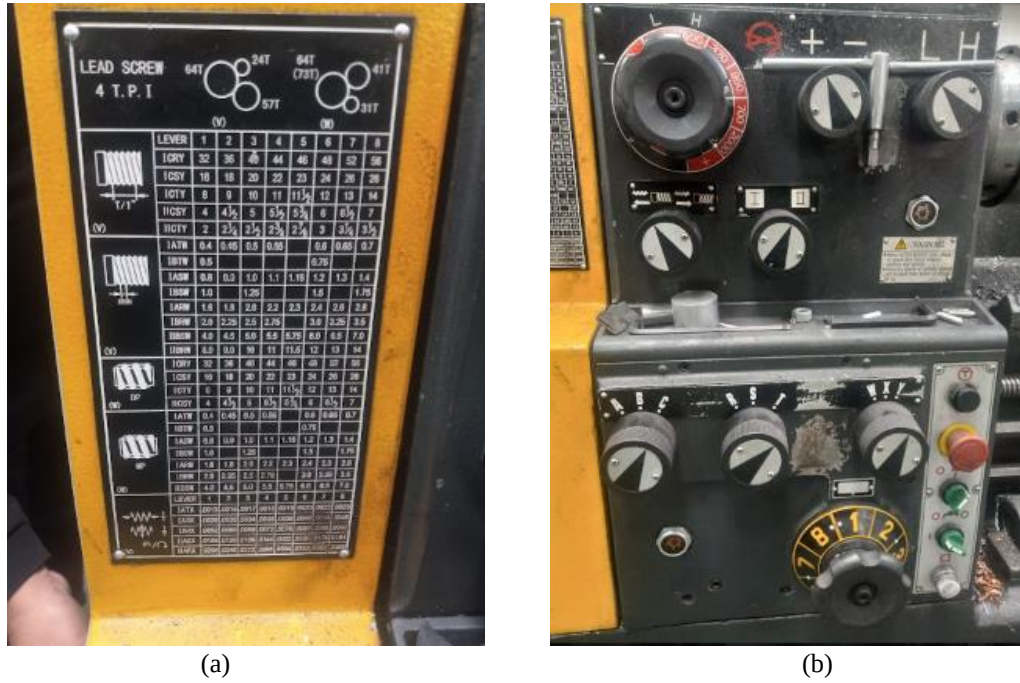


Figura 18. Configuración de torno para el desbaste de materiales: (a) hoja técnica, (b) configuración manual.

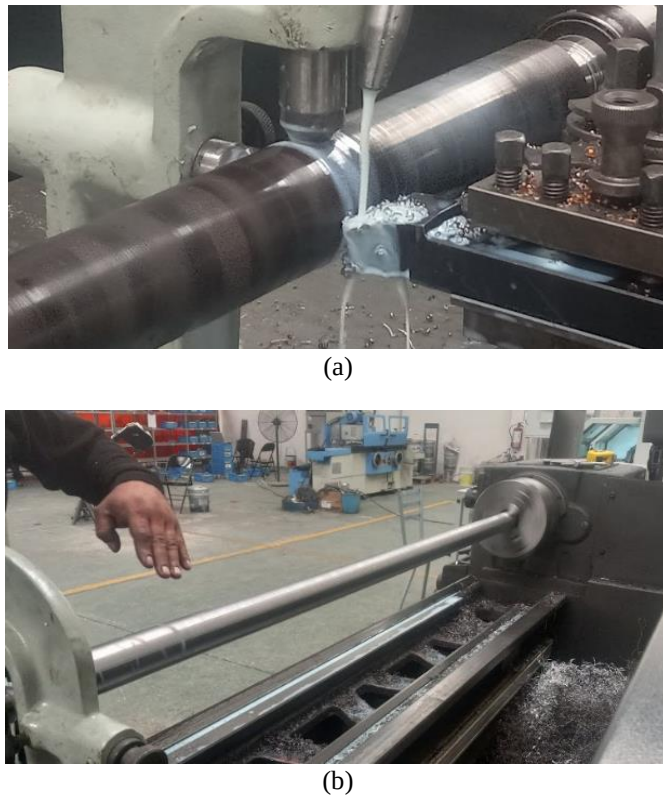


Figura 19. Proceso de desbaste del material a utilizar para el husillo: (a) inicial, (b) final.

Ingeniería Industrial

Diseño y manufactura de un husillo para una máquina extrusora horizontal de plásticos: metrología y caracterización de materiales



Figura 20. Configuración de los parámetros del torno para la generación de rosca tipo ACME.



(a)



(b)

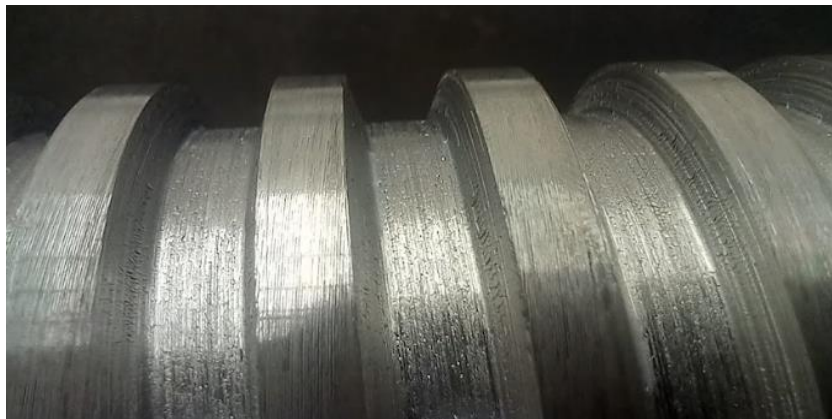
Figura 21. Inicio del desbaste para la generación de la cuerda ACME: (a) primera cuerda, (b) acabado primera cuerda.

Ingeniería Industrial

Diseño y manufactura de un husillo para una máquina extrusora horizontal de plásticos: metrología y caracterización de materiales



(a)

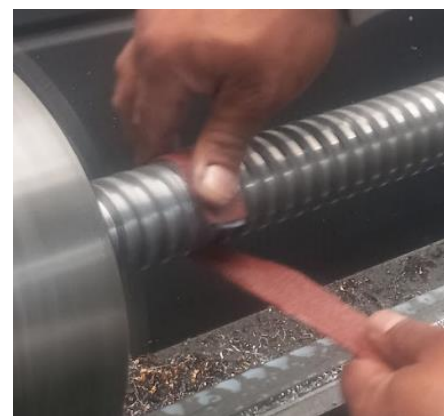


(b)

Figura 22. Finalización de la generación de la rosca tipo ACME: (a) rosca concluida, (b) acercamiento.



(a)



(b)

Figura 23. Lijado del husillo con el fin de eliminar filos: (a) lijado, (b) acercamiento.



Figura 24. Husillo finalizado.

3.3 MODELOS MATEMÁTICOS DEL DISEÑO DEL HUSILLO

Si bien se empleo el software de SolidWorks® para elaborar el diseño del husillo y se contaba ya con la barra de trabajo (med. 1500 m de largo y 50 mm de diámetro exterior), se consideraron los siguientes ecuaciones matemáticas [38] para calcular los elementos necesarios para elaborar en el torno el diseño de rosca trapecial tipo ACME del husillo. En la Figura 25, se observan los parámetros teóricos del husillo declarados por [38]. En la Figura 26, se presentan los parámetros teóricos del husillo bajo las condiciones de diseño propuestas.

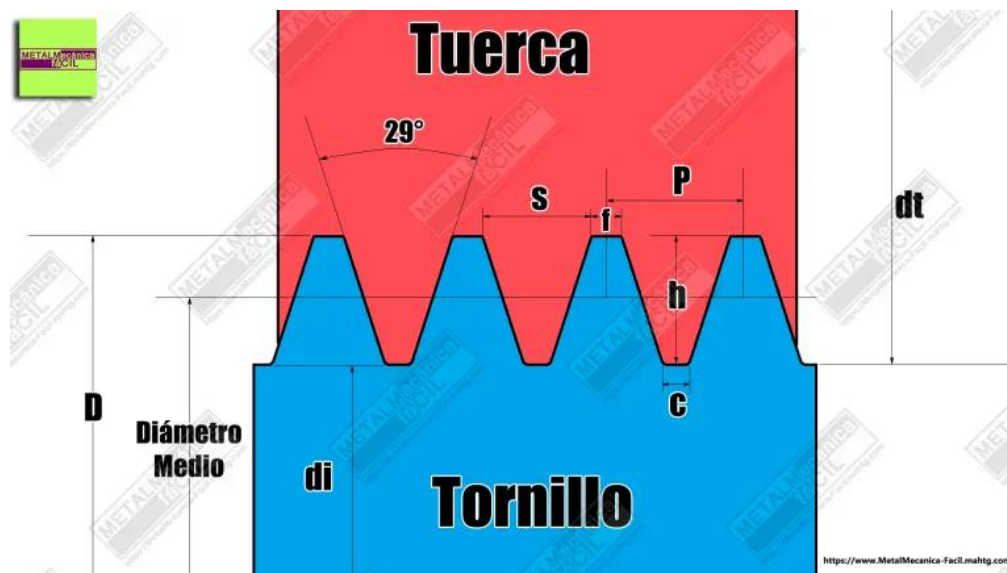


Figura 25. Esquema de identificación de las partes que componen la rosca tipo ACME. Tomada de [38].

Ingeniería Industrial

Diseño y manufactura de un husillo para una máquina extrusora horizontal de plásticos: metrología y caracterización de materiales

Debido a que se contaba con la barra de acero para fabricar el husillo y, después de un desbaste inicial, se cuenta con el valor constante del diámetro de husillo

$$D = \text{Diámetro exterior del tornillo} = 47.99 \text{ mm} = 1.8897 \text{ plg.}$$

De acuerdo a [37] la rosca ACME (medida americana) tiene un perfil del diente igual a 29° . Por condiciones del tipo de torno empleado en este trabajo, se selecciono un perfil del diente de 95° , por tanto,

$$\alpha = 95^\circ \text{ (perfil del diente).}$$

Por condiciones de manufactura del tipo de torno empleado, se selecciona un valor constante de 2 hilos/pulgada, esto es,

$$N = 2 \text{ hilos/plg.}$$

Por tanto,

p = paso del tornillo

$$p = 0.2 \cdot D = 0.2 (1.8897 \text{ plg}) = 0.3779 \text{ plg} = 9.59 \text{ mm.}$$

h = altura (profundidad) del filete

$$h = (0.5 \cdot p) + 0.010 \text{ plg} = (0.5 \cdot 0.3779 \text{ plg}) + 0.010 \text{ plg} = 0.1989 \text{ plg} = 5.05 \text{ mm}$$

f = ancho de la cresta

$$f = 0.3707 \cdot p = 0.3707 \cdot 0.3779 \text{ plg} = 0.14 \text{ plg} = 3.55 \text{ mm}$$

c = ancho del fondo

$$c = (0.3707 \cdot p) - 0.0052 \text{ plg} = (0.3707 \cdot 0.3779 \text{ plg}) - 0.0052 \text{ plg} = 0.1348 \text{ plg} = 3.42 \text{ mm}$$

s = distancia entre dos flancos consecutivos

$$s = 0.6292 \cdot p = 0.6292 \cdot 0.3779 \text{ plg} = 0.2377 \text{ plg} = 6.03 \text{ mm}$$

A partir lo señalado por [37], se puede definir que el diámetro al fondo del tornillo (d_i), se puede determinar por

$$D = d_i + 2h, \text{ por tanto, } d_i = D - 2h = 1.8897 \text{ plg} - (2 \cdot 0.1989 \text{ plg}) = 1.4919 \text{ plg} = 37.89 \text{ mm}$$

dt = diámetro a torneear la tuerca, en esta caso este parámetro no aplica.

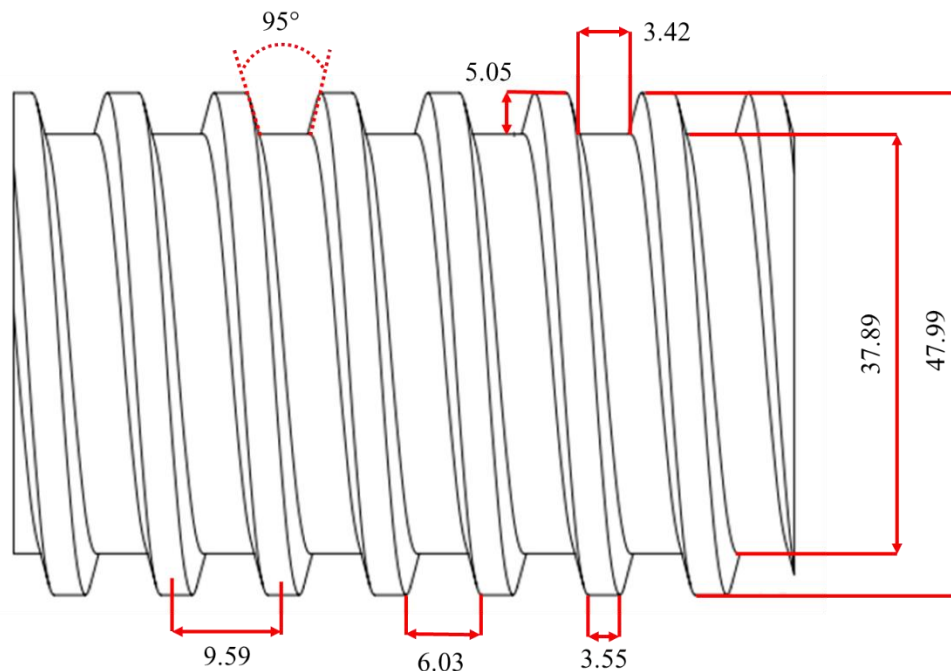


Figura 26. Dimensiones teóricas obtenidas mediante modelación matemática de los parámetros del diseño del husillo propuesto.

3.4 PRUEBAS DE METROLOGÍA EN EL HUSILLO

La medición de las dimensiones de la configuración geométrica final del husillo se realizó solo empleando un calibrador vernier y flexómetro y se estimó la incertidumbre entre las dimensiones de los diseños del husillo y la pieza final manufacturada. La medición de las revoluciones del husillo (pruebas experimentales) se realizó empleando un tacómetro dual DT-2236 marca Lutron.

3.5 PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL HUSILLO

La caracterización de materiales se centró en una caracterización mecánica. Sin embargo, por la indisponibilidad de equipos especializados de caracterización mecánica de materiales no se midieron las propiedades mecánicas del husillo. Para cumplir lo anterior, se realizó una exhaustiva investigación documental sobre las propiedades del acero empleado para la fabricación del husillo.

3.6 PRUEBAS DE INTEGRACIÓN DEL HUSILLO A LA EXTRUSORA

Para comprobar la funcionalidad del husillo diseñado y construido, se realizaron pruebas de velocidad de giro del mismo, para ello el husillo fue adaptado mediante una cadena de paso 60 medida $\frac{3}{4}$ y un sprocket 60B13 medida $\frac{3}{4}$ al sistema de empuje mecánico (no presentado) y a un sistema de mando eléctrico (no presentado). Se

Ingeniería Industrial

Diseño y manufactura de un husillo para una máquina extrusora horizontal de plásticos: metrología y caracterización de materiales

obtuvieron gráficas de frecuencia contra velocidad de rotación. En la Figura 27, se muestra el sistema de empuje mecánico acoplado al cuello del husillo. En la Figura 28, se visualiza el sistema de mano eléctrico de la extrusora.



Figura 27. Sistema de empuje mecánico de la extrusora.

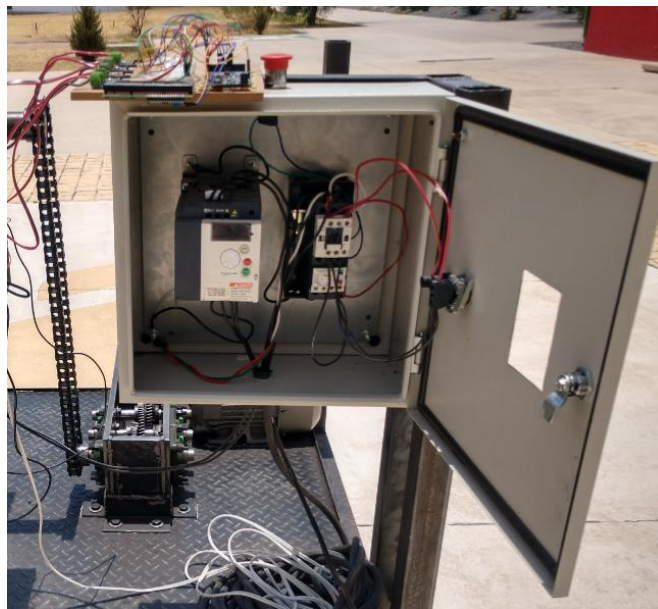


Figura 28. Sistema de mando eléctrico de la extrusora.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Por razones de patentado se reserva demás evidencia de ejecución y datos dimensionales del husillo.

4.1 DISEÑOS CAD 3D

De las Figuras 29 a la 31, se muestran vistas isométricas del diseño del husillo. Las Figuras 32 y 33, presentan dibujos técnicos del husillo con cotas (unidades en mm).

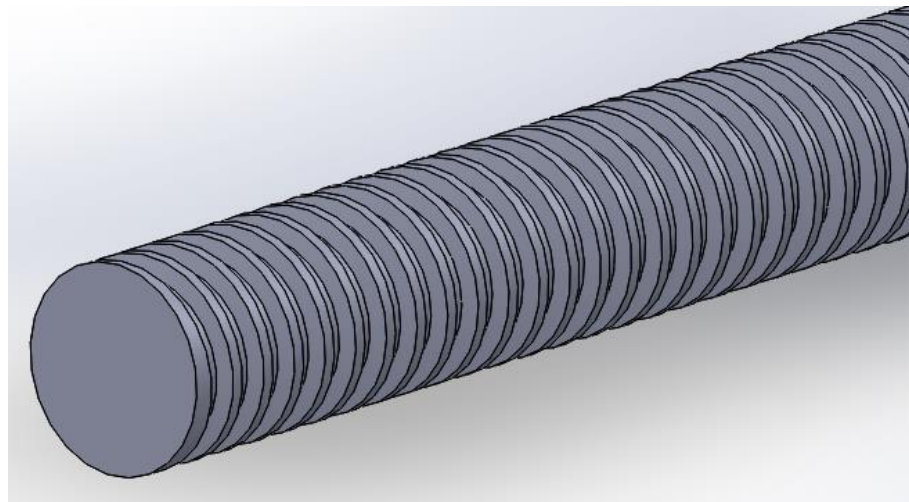


Figura 29. Vista de la punta del husillo.

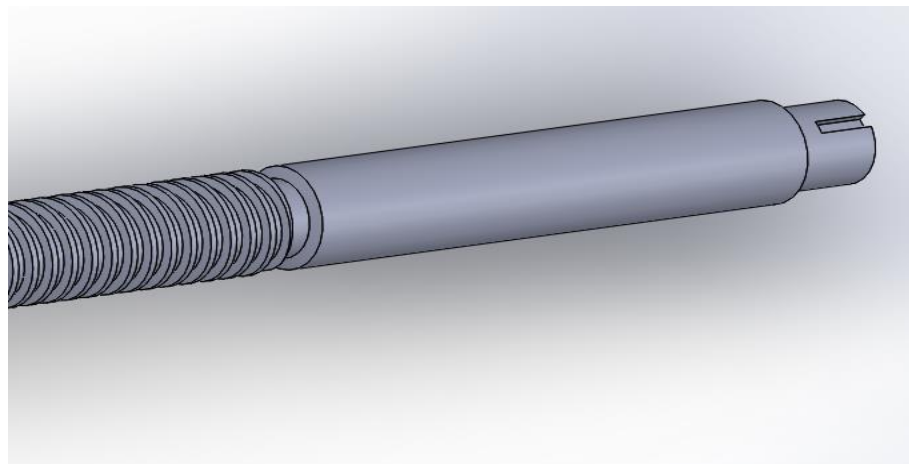


Figura 30. Vista del cuello del husillo.

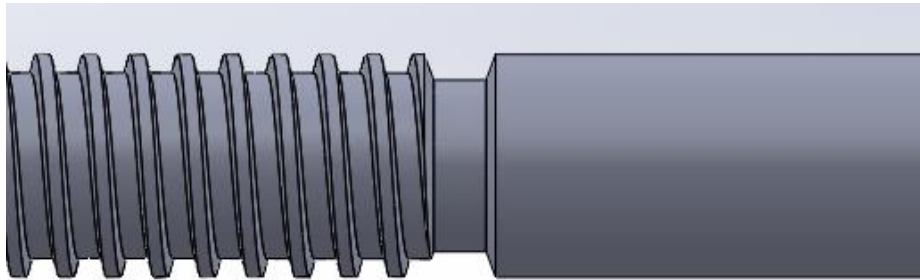


Figura 31. Área de desahogo del husillo.

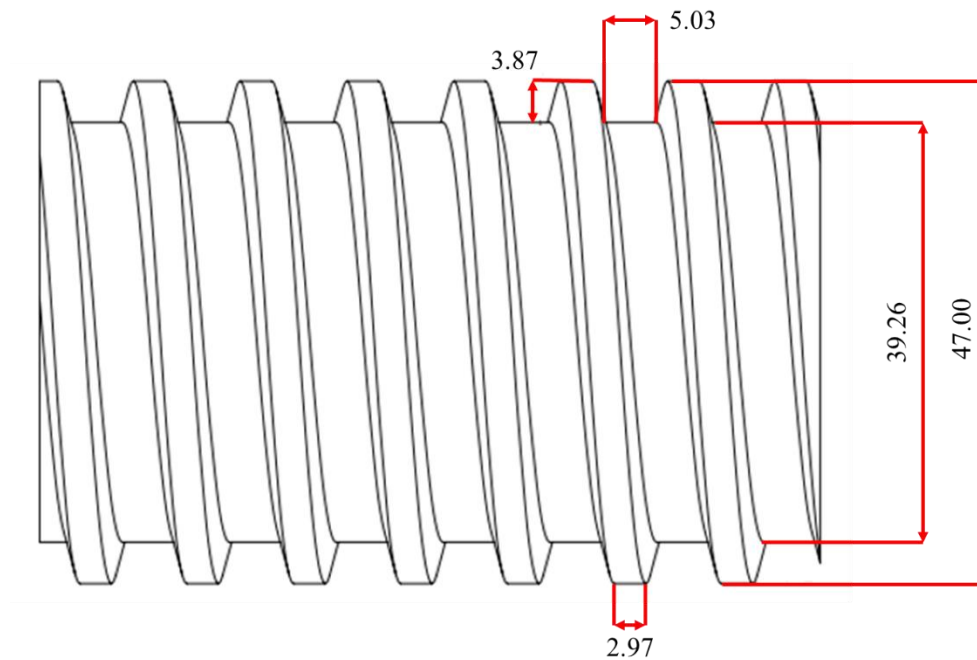


Figura 32. Dimensiones teóricas obtenidas mediante simulación en SolidWorks® de los parámetros del diseño del husillo propuesto.

Ingeniería Industrial

Diseño y manufactura de un husillo para una máquina extrusora horizontal de plásticos: metrología y caracterización de materiales

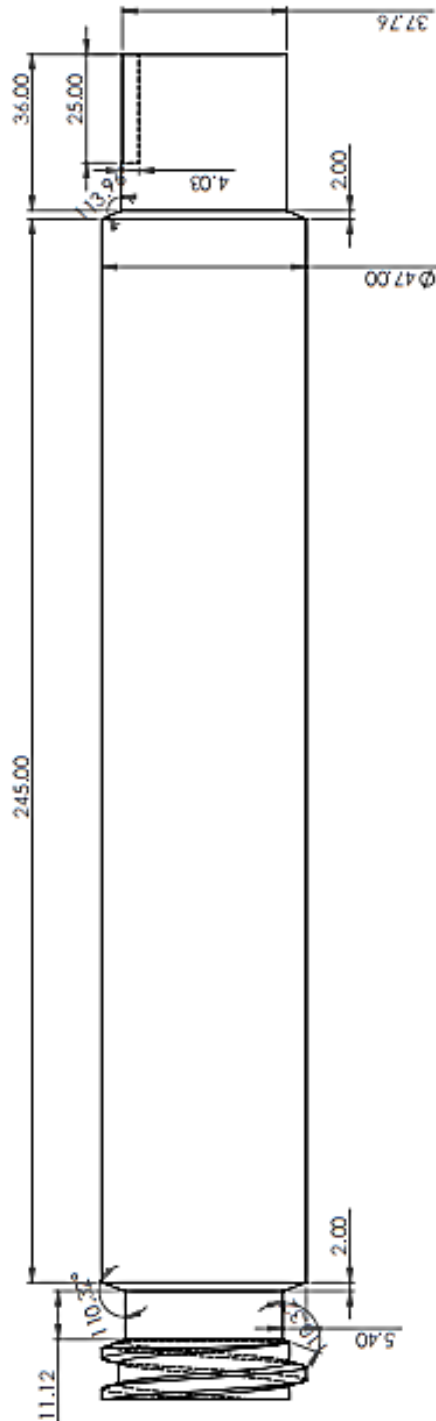


Figura 33. Parte extrema trasera de husillo y sus dimensiones.

4.2 MANUFACTURA DEL HUSILLO

De las Figuras 34 a la 44, se muestran imágenes de la manufactura del husillo en la empresa externa. En esta etapa se participo como asistente de torno para poder contar con la experiencia del maquinado de este tipo de piezas.



Figura 34. Torneado inicial de husillo para ajuste al barril (maquinado previo al de formación de alabes). Actividad realizada dentro de ITPA. Disminución de diámetro de 50 a 48.5 mm.



Figura 35. Colocación del cilindro en el torno, para comenzar su desbaste.

Ingeniería Industrial

Diseño y manufactura de un husillo para una máquina extrusora horizontal de plásticos: metrología y caracterización de materiales

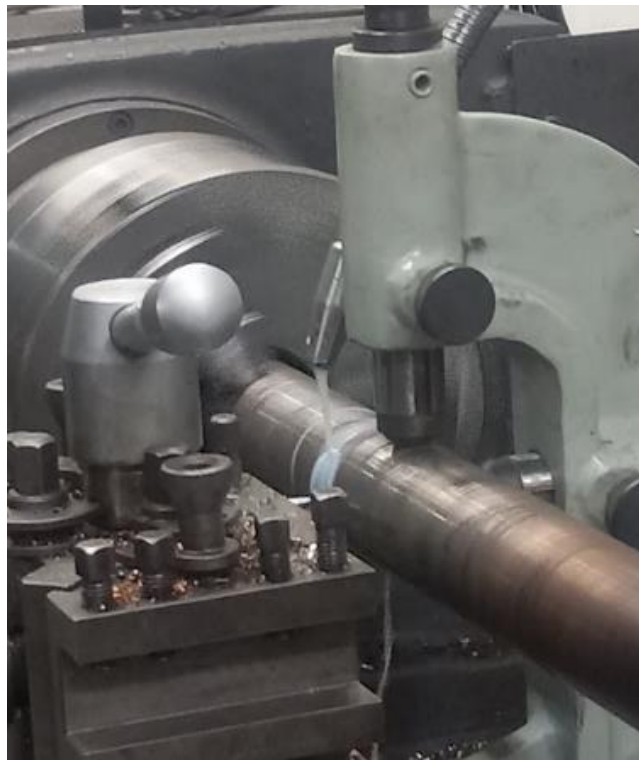


Figura 36. Desbaste del cilindro.

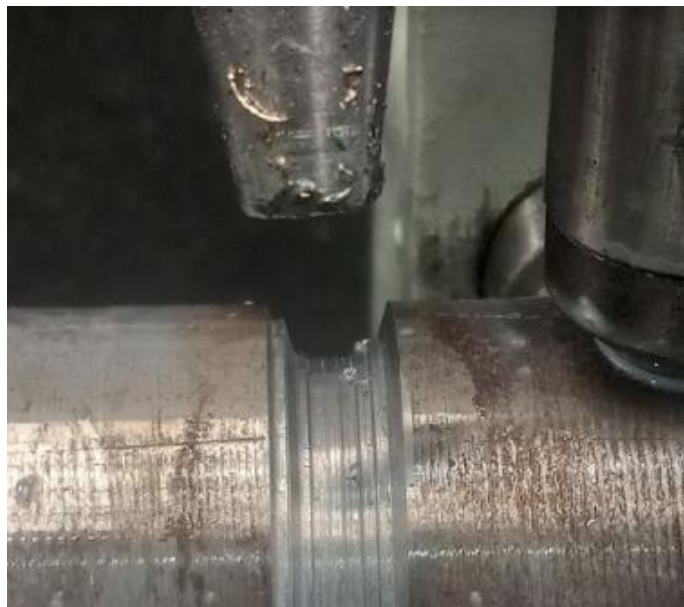


Figura 37. Área de desahogo para evitar rupturas en el cortado.

Ingeniería Industrial

Diseño y manufactura de un husillo para una máquina extrusora horizontal de plásticos: metrología y caracterización de materiales

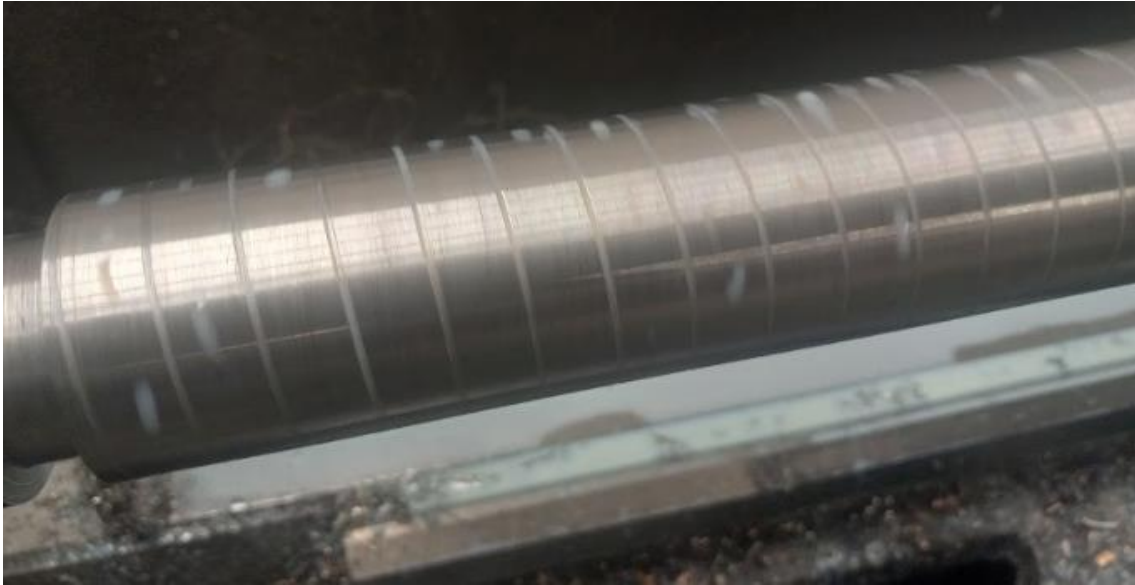


Figura 38. Primeras impresiones de la generación de la rosca ACME.

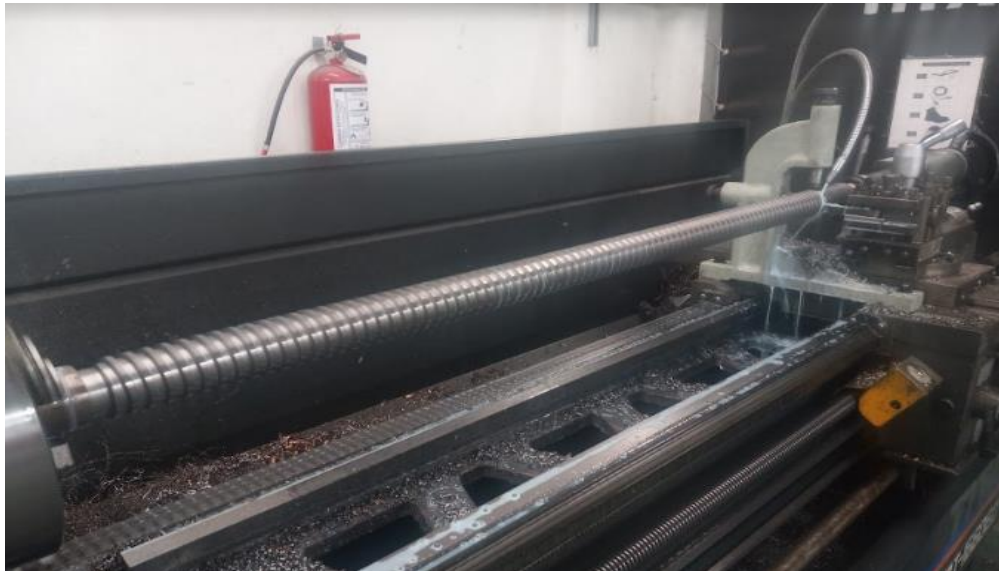


Figura 39. Impresiones antes de finalizar el mecanizado del cilindro.

Ingeniería Industrial

Diseño y manufactura de un husillo para una máquina extrusora horizontal de plásticos: metrología y caracterización de materiales



Figura 40. Eliminación de filos en los alabes del husillo mediante lijado.



Figura 41. Vista completa del husillo con alabes maquinados.

Ingeniería Industrial

Diseño y manufactura de un husillo para una máquina extrusora horizontal de plásticos: metrología y caracterización de materiales



Figura 42. Acercamiento de alabes maquinados (punta del husillo).



Figura 43. Acercamiento de alabes maquinados (extremo del husillo adjunto al cuello).



Figura 44. Cuello del husillo con ranura para comunicación con sistema de empuje.

4.3 PRUEBAS DE ROTACIÓN DEL HUSILLO

Se realizaron pruebas simples de rotación del husillo. Las pruebas se realizaron con el sistema de empuje, sistema de mando eléctrico y el husillo conectados entre sí. La medición de los rpm se realizó empleando un tacómetro dual DT-2236 marca Lutron. En la Figura 45, se presentan los resultados obtenidos. La velocidad de rotación del husillo disminuye conforme se va disminuyendo la frecuencia del sistema de empuje y de mando eléctrico.

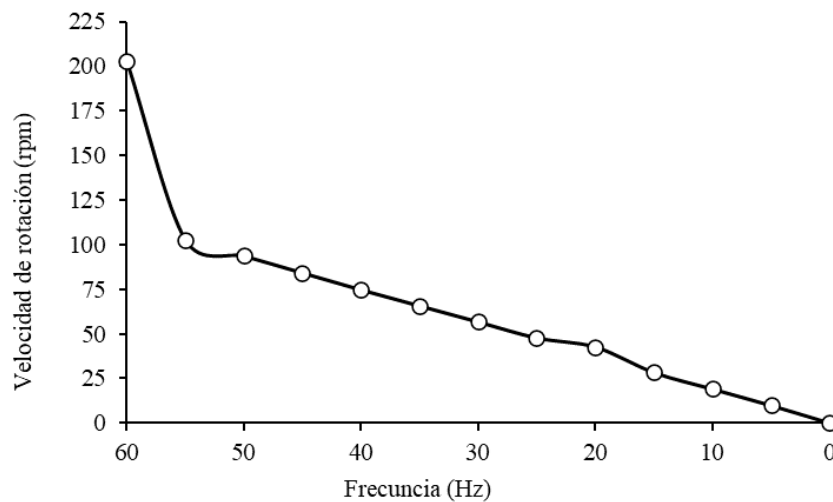


Figura 45. Velocidades de rotación del husillo obtenidos experimentalmente con el husillo integrado a la extrusora.

4.4 PRUEBAS DE METROLOGÍA EN EL HUSILLO

Mediante el uso de un calibrador vernier y flexómetro se realizaron las mediciones finales de los parámetros del husillo manufacturado. En la Figura 46 y 47, se muestran mediciones metrológicas del husillo. En la Figura 48, se presentan los valores reales del husillo manufacturado. En la Tabla 1, se hace un comparativo de las medidas de los parámetros (i) determinados por modelos matemáticos, (ii) declarados en el diseño CAD 3D y (iii) los reales obtenidos después de la manufactura en el tipo de torno empleado. En la Tabla 2, se describen los porcentajes de diferencia entre las mediciones los parámetros del husillo definidor por las ecuaciones contra la manufactura del tornillo. En la Tabla 3, se describen los porcentajes de diferencia entre las mediciones los parámetros del husillo definidos por el diseño CAD 3D contra la manufactura del tornillo.

De manera general, se presentan diferencias desde 0.00 hasta un 68%, según el parámetro de comparación, esto sugiere que la manufactura del husillo, si bien se basa en diseños, puede variar según las condiciones de operación del torno de trabajo. Sin embargo, no deja de ser útil primeramente contar con los diseños para dar una idea inicial de la configuración final del husillo manufacturado.



Figura 46. Medición de longitud del husillo con flexómetro.

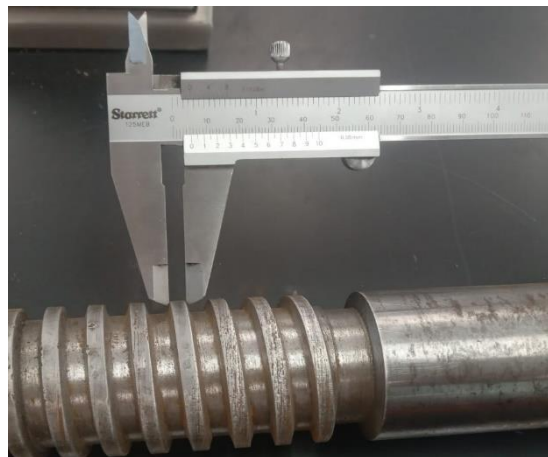


Figura 47. Medición de dimensiones helicoidales con vernier.

Ingeniería Industrial

Diseño y manufactura de un husillo para una máquina extrusora horizontal de plásticos: metrología y caracterización de materiales

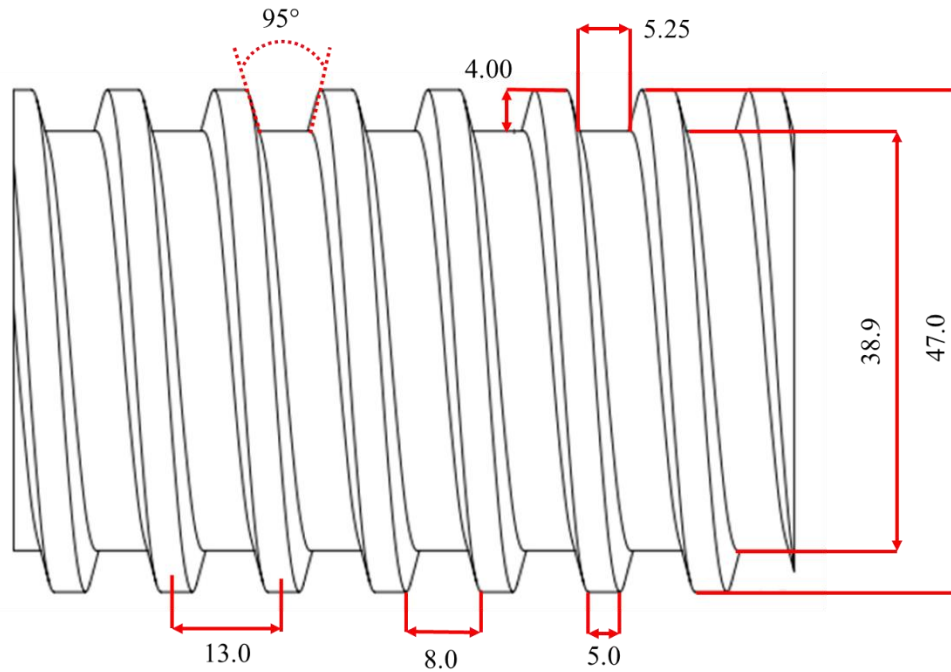


Figura 48. Dimensiones reales del husillo manufacturado.

Tabla 1. Dimensiones de los parámetros del husillo.

PARÁMETRO	ECUACIONES	DISEÑO CAD 3D	MANUFACTURA
α (°)	29	95	95
D (mm)	47.99	47.00	47.00
N (hilos/plg)	2	2	2
h (mm)	5.05	3.87	4.00
f (mm)	3.55	2.97	5.00
c (mm)	3.42	5.03	5.25
s (mm)	6.03	-----	8.00
p (mm)	9.59	-----	13.00
di (mm)	37.89	39.26	38.90

Tabla 2. Diferencia en la medición de los parámetros de ecuaciones vs manufactura.

PARÁMETRO	% diferencia
D (mm)	2.06
N (hilos/plg)	0.00
h (mm)	20.79
f (mm)	40.85
c (mm)	53.51
s (mm)	32.67
p (mm)	35.56
di (mm)	2.67

Tabla 3. Diferencia en la medición de los parámetros de diseño CAD 3D vs manufactura.

PARÁMETRO	% diferencia
<i>D</i> (mm)	0.00
<i>N</i> (hilos/plg)	0.00
<i>h</i> (mm)	3.36
<i>f</i> (mm)	68.35
<i>c</i> (mm)	4.37
<i>s</i> (mm)	-----
<i>p</i> (mm)	-----
<i>di</i> (mm)	0.92

4.5 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN DEL HUSILLO

Debido a la indisponibilidad de una máquina universal de ensayos, se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva con especialistas del acero de las características del acero 4140 AISI SAE templado en aceite empleado para manufacturar el husillo [37], [39]–[45]. En la Tabla 4, se presenta un resumen de las propiedades de este material. Conforme las propiedades analizadas, se determina que el acero 4140T, adquirido en tiendas comerciales de fácil acceso, es el pertinente para manufacturar el husillo propuesto, aun y cuando no haya sido sometido a un temple en aceite posterior a su torneado.

Tabla 4. Propiedades del acero 4140.

PROPIEDAD	VALOR
Densidad	7,850 kg/m ³
Conductividad térmica	42.6 W/m °C
Relación de Poisson	0.29
Modulo de Young	2.05 x 10 ¹¹ Pa
Esfuerzo de fluencia a la tensión	1.34 x 10 ⁹ Pa
Esfuerzo ultimo a la tensión	1.45 x 10 ⁹ Pa
Expansión térmica a 100 °C	1.22 x 10 ⁻⁶ 1/°C
Expansión térmica a 400 °C	1.37 x 10 ⁻⁶ 1/°C
Calor especifico a 200 °C	473 J/kg °C
Calor especifico a 400 °C	519 J/kg °C

V. CONCLUSIONES

Se logró el diseño y manufactura de un husillo para una máquina extrusora horizontal prefabricada. El husillo fue diseñado y manufacturado con acero 4140T con las siguientes características:

L_{total} de 1500 mm de largo, con L_1 de 1200 mm de cuerda y L_2 de 300 mm de cuello (*spline*),

D de 47 mm, monocapa (alimentación, compresión, dosificación),

roscado de tipo ACME con un paso de rosca de 2 hilos por pulgada,

$\alpha = 95^\circ$, $p = 13.0$ mm, $h = 4.00$ mm, $f = 5.00$ mm, $c = 5.25$ mm, $s = 8.00$ mm y $di = 38.90$ mm.

Asimismo, se aplicaron herramientas de metrología y caracterización de materiales para validar la manufactura del husillo:

- Se obtuvieron porcentajes de diferencias de medición entre modelo matemático-manufactura y diseño CAD 3D-manufactura entre 0 hasta un 68%, según el parámetro de comparación. Estas diferencias no afectan la funcionalidad del husillo, simplemente manifiestan que los modelos matemáticos o de diseño pueden cambiar al momento de llevar a cabo físicamente la manufacturación de la pieza. Principalmente la variación se atribuye a las condiciones de operación del torno manual de trabajo empleado. Sin embargo, no deja de ser útil primeramente contar con los diseños para dar una idea inicial de la configuración final del husillo manufacturado.
- Conforme la revisión de la literatura realizada, se concluye que el acero 4140T empleado para la manufactura del husillo fue el mas idóneo, aunque no haya sido sometido a un temple en aceite posterior a su torneado, para aumentar sus propiedades de dureza y resistencia.

Igualmente, la validación del husillo manufacturado fue comprobado mediante las pruebas de rotación a las que fue sometido al ser integrado a la extrusora. El husillo embona perfectamente en el barril y la rotación puede ser controlada desde 0 a 200 rpm sin ninguna percepción de fallo del tornillo.

Como trabajo a futuro, se considera emplear el husillo directamente en pruebas de extrusión de plásticos en la máquina extrusora horizontal para validar la configuración de diseño del mismo.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Beltrán-Rico, M. & Marcilla-Gomis, A. (2012). *Tecnología de polímeros*. Ed. Universitat d'Alacant, España.
- [2] Gómez-Gómez, J. J. & Gutiérrez-Bedoya, J. E. (2007). *Diseño de extrusora para plástico* [Tesis de Licenciatura]. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Risaralda, Colombia.
- [3] Cifuentes-C., R. (2011). *Diseño de una máquina extrusora para la empresa Plastik de Occidente* [Tesis de Licenciatura]. Universidad del Valle, Santiago de Cali, Valle del Cauca, Colombia.
- [4] Chávez-Martínez, J. E. (2018). *Diseño de extrusora de filamento para impresora 3D fabricado a partir de polipropileno reciclado* [Tesis de Licenciatura]. Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, México.
- [5] Hussmann, J. & Kurth, D. Machine for the preparation and extrusion of plastics. *Patent EE. UU. No. 3825236*. 1974, United States Patent Office.
- [6] Tecnobimetric. (18/01/2019). Maquinas extrusoras de plástico: Que son y para que sirven. <https://www.tecnobimetric.com/maquinas-extrusoras-de-plastico-que-son-y-para-que-sirven/>
- [7] Shanghai JWELL Extrusion Machinery Co., Ltd. (s. f.) Catalogo de maquinaria de extrusión. https://pdf.directindustry.es/pdf/jwell-extrusion-machinery-co-ltd-shanghai/maquinaria-extrusion/73842-646985-_5.html
- [8] Shingón-Collahuazo, O. A. & Uvillus-Tipan, G. J. (2019). *Construcción de una máquina extrusora de plástico* [Tesis de Licenciatura]. Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador.
- [9] Bastidas, F., López, S., Flores, C. & Vásquez, D. (2022). Design of an extruder machine to obtain aggregates using tires and recycled bottles following the AASTM E11 standard. *Polo del conocimiento*, 70(7), 803-813. Doi: 10.23857/pc.v7i7
- [10] Tubón-Velez, E. O. & Carrillo-Sinche, B. F. (2014). *Diseño y construcción de un extrusor de tornillo para la obtención de pellets de botellas plásticas de PET recicladas* [Tesis de Licenciatura]. Escuela superior politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- [11] Acuña-Fonseca, G. H. & Salamanca-Vanegas, M. E. (2016). *Diseño y construcción de una máquina extrusora para la fabricación de filamentos termoplásticos para impresora 3D* [Tesis de Licenciatura]. Universidad de Santo Tomas Tunja, Tunja, Colombia.
- [12] Escamilla-Esquivel, A. (2014). *Metrología y sus aplicaciones*. Grupo Editorial Patria.
- [13] M.-Marbán, R. & Pellecer-C., J. A. (2002). *Metrología para No-metrólogos*. OEA-SIM.
- [14] de Carlos-López, E. & López-Romero, J. M. (25 al 27/10/2004). Estabilización en frecuencia de láseres semiconductores y su aplicación en la metrología de tiempo y frecuencia. *Simposio de Metrología 2004*, Centro Nacional de Metrología, Querétaro, México.

-
- [15] Sierra-Sosa, D. E. (2014). *Estudio de singularidades de fase con aplicaciones a la metrología* [Tesis de Doctorado]. Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina.
- [16] López-R., M., Domínguez-L., I., López-L., S., de Carlos-L., E. & Ramírez-Reyes, H. (2001). Manipulación de átomos con luz y sus aplicaciones en metrología. *Superficies y vacío*, 13, 97-104.
- [17] Infinitia Ind. Consult. (s. f.). Caracterización de materiales. <https://www.infinitiaresearch.com/laboratorio-ingenieria-industrial/caracterizacion-materiales/>
- [18] Fuentes-Espinoza, F. (1982). *Ensayos mecánicos en metales* [Tesis de Maestría]. Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, Nuevo León, México.
- [19] Rivera-Garibay, O. O., Álvarez-Filip, L., Rivas, M., Garelli-Ríos, O., Pérez-Cervantes, E. & Estrada-Saldívar, N. (2020). Impacto de la contaminación por plástico en áreas naturales protegidas mexicanas. Greenpeace México.
- [20] Procuraduría federal del consumidor. (02/06/2021). Contaminación por plástico. <https://www.gob.mx/profeco/es/articulos/contaminacion-por-plastico?idiom=es>
- [21] Arandes, J. M., Bilbao, J. & López-Valerio, D. (2004). Reciclado de plásticos. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 5(1), 28-45.
- [22] Turpo-Mamani, S. M. (2019). *Reciclado de plástico (PET) para la elaboración de adoquín mediante el proceso de extrusión* [Tesis de Licenciatura]. Universidad Peruana Unión, Juliaca, Perú.
- [23] Aristegui Maquinaria. (s. f.). Fabricación de plásticos: el proceso de extrusión. <https://www.aristegui.info/fabricacion-de-plasticos-el-proceso-de-extrusion/>
- [24] Tecnología de los plásticos. (15/03/2011). Extrusión de materiales plásticos. <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/03/extrusion-de-materiales-plasticos.html>
- [25] Pérez-Nepta, J. (05/10/2019). Curso de maquinas mecánicas: tema 7 inyectora de plásticos/Extrusión de plásticos. http://www.portalelectromecanico.org/CURSOS/inectoras/extrusion_de_plasticos.html
- [26] Lantai Plastics Machinery. (s. f.). Extrusor de doble husillo Co-rotativo series SPJ. <http://www.screwextrudermachine.com/es/co-rotating-twin-screw-extruder.html>
- [27] Suárez-Romero, J. D. (2015). *Proyecto de máquina extrusora, para creación de hilos de poli etilén tereftalato* [Tesis de Licenciatura]. Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México.
- [28] Grupo JANFREX. (s. f.). Rodillos de extrusión ¿Cómo darles mantenimiento?. <https://www.janfrex.mx/site/rodillos-de-extrusion/>
- [29] Otero-Jaramillo, J. C., Gutiérrez-Morales, P. A. & Bornacelli-Castillo, J. F. (2008). *Metodología para el diseño de tornillos de máquinas extrusoras monohusillo* (1a ed.), Ed. Universidad Autónoma de Occidente, Colombia.
- [30] Lerma, J. R. (11/07/2016). El mecanismo del husillo. Interempresas: plástico. <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/159596-El-mecanismo-del-husillo.html>

-
- [31] Ortiz-Abata, C. F. (2018). *Diseño y construcción de una máquina extrusora de filamentos de 1.75 mm y 3 mm para impresoras 3D, a partir de polímero reciclado* [Tesis de Licenciatura]. Universidad de las Fuerzas Armadas, Latacunga, Ecuador.
- [32] Revista española de electrónica. (26/08/2021). Que es un vernier y para que se utiliza?. <https://www.redeweb.com/actualidad/vernier/>
- [33] Pérez-Porto, J., Gardey, A. (25/11//2019). Flexómetro - Qué es, definición y concepto. Definicion.de. (actualización el 25/11/2020). <https://definicion.de/flexometro/>
- [34] disfrutalasmaticas. (s. f.). Porcentaje de diferencia. [https://www.disfrutalasmaticas.com/numeros/porcentaje-diferencia.html#:~:text=Respuesta%20\(M%C3%A9todo%20\)%3A,decir%20un%20aumento%20de%2020%25.](https://www.disfrutalasmaticas.com/numeros/porcentaje-diferencia.html#:~:text=Respuesta%20(M%C3%A9todo%20)%3A,decir%20un%20aumento%20de%2020%25.)
- [35] upv.es (s. f.). Unidad 2. Características mecánicas de los materiales: 1. Indicadores de propiedades resistentes. https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm02/fcm2_1.html
- [36] García-Moreno, A. M. & Monasterio-Guisasola, N. (2018). *Introducción a la ciencia de los materiales y sus propiedades (I): tema 6, comportamiento mecánico de los materiales*. Ed. Universidad del País Vasco, España.
- [37] Rubio-Cordon, J. A. & Galvis-Florez, D. O. (2009). *Diseño construcción y prueba de una extrusora horizontal de tornillo sencillo para polietileno de baja densidad* [Tesis de Licenciatura]. Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia.
- [38] Tibanta, M. A. (s. f.). Como hacer la rosca AMCE en el torno: metalmecánica fácil. <https://www.metalmecanica-facil.mahtg.com/la-rosca-acme-torno/>
- [39] Cia. General de aceros. (s. f.). Ficha técnica de acero 4140. Disponible en https://www.cga.com.co/wp-content/uploads/2020/07/Ficha_T%C3%A9cnica_Aceros_Grado_Ingenier%C3%ADa_4140.pdf
- [40] Ferrecortes SAS. (s. f.). Ficha técnica de acero 4140. Disponible en <https://www.ferrocortes.com.co/acero-4140/>
- [41] Otero Industrial (s. f.). Ficha técnica de acero 4140. Disponible en <https://oteroindustrial.cl/fichas/Acero-aleado-SAE4140.pdf>
- [42] IIRSACERO (s. f.). Acero 4140 y 4140T. <https://iirsacero.com.mx/acero-4140/#>
- [43] Paladines, A. U., Aperador, W. & Esqueda, F. (2011). Evaluación de las propiedades tribológicas y corrosión del Sistema CrN/Cr depositado sobre acero AISI 304, 4140, 1075 por la técnica Magnetron Sputtering Reactivo DC. *AVANCES Investigación en Ingeniería*, 13, 61-70.
- [44] Nuñez-Saravia, J. W. & Yanguisela-Loachamin, A. D. (2020). *Validación de la variación de las propiedades mecánicas a la torsión del acero AISI/SAE 4140 tratado térmicamente por temple a 830 °C – 860 °C y revenido a 500 °C* [Tesis de Licenciatura]. Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.

Ingeniería Industrial

Diseño y manufactura de un husillo para una máquina extrusora horizontal de plásticos: metrología y caracterización de materiales

- [45] Guaca-Trujillo, Y. J. & Aparicio-García, S. (2009). *Diseño y fabricación de una máquina para realizar ensayos de torsión a probetas de careo con propiedades mecánicas iguales o inferiores al acero 4140 normalizado* [Trabajo de grado]. Universidad ECCI, Bogotá, Colombia.