

Rediseño de una máquina automatizada, extrusora de plástico fundido, utilizando botellas PET para la fabricación de filamentos para impresoras 3D

Redesign of an automated machine, cast plastic extruder, using PET bottles for the manufacture of filaments for 3D printers

Luis Humberto López-Flores¹, Andrés Garcés Chávez²,
Claudio López-García³, Luis Manuel Valverde-Cedillo⁴

Tecnológico de Estudios Superiores de Chalco, MÉXICO

¹ <https://orcid.org/0000-0003-3730-000X> | luis_lf@tesch.edu.mx

² <https://orcid.org/0000-0003-4079-2930> | andres_gc@tesch.edu.mx

³ <https://orcid.org/0000-0002-8361-8249> | claudio_lg@tesch.edu.mx

⁴ <https://orcid.org/0000-0003-1204-883X> | luis_vc@tesch.edu.mx

Recibido 02-12-2022, aceptado 15-02-2023.

Resumen

El presente trabajo está enfocado en la fabricación de filamento para impresoras 3D a base de botellas de PET. Pasando por un proceso de trituración para generar hojuela, posteriormente se fundirá, depositándola en el extrusor, para después empujar el plástico fundido hacia las boquillas con un diámetro de 1.75 mm, al final de la etapa pasaran por ventiladores de enfriamiento permitiendo así un mejor endurecimiento del producto al momento de realizar el embobinado del mismo; logrando de esta forma unir en una sola máquina el proceso completo de producción de filamento para impresoras 3D. Incorporándonos en el mercado de filamento para impresoras 3D y generando con ello un enfoque más positivo para la sociedad al igual que mejorar nuestro entorno ecológico.

Palabras clave: extrusión, trituración, PET, filamento, impresoras 3D.

Abstract

This work is focused on the manufacture of filament for 3D printers based on PET bottles. Going through a crushing process to generate flake, then it will be melted by depositing it in the extruder obtaining a casting process to then push the molten plastic into the nozzles with a previously established diameter, at the end of the stage will go through cooling fans allowing a better hardening of the product at the time of winding the same; thus achieving to unite in a single machine the entire process of production of filament for 3D printers. In this way we intend to join the market of the 3D printer industry and thus generating a more positive approach to society as well as improving our ecological environment.

Index terms: extrusion, trituration, PET, filament, 3D printers.

I. INTRODUCCIÓN

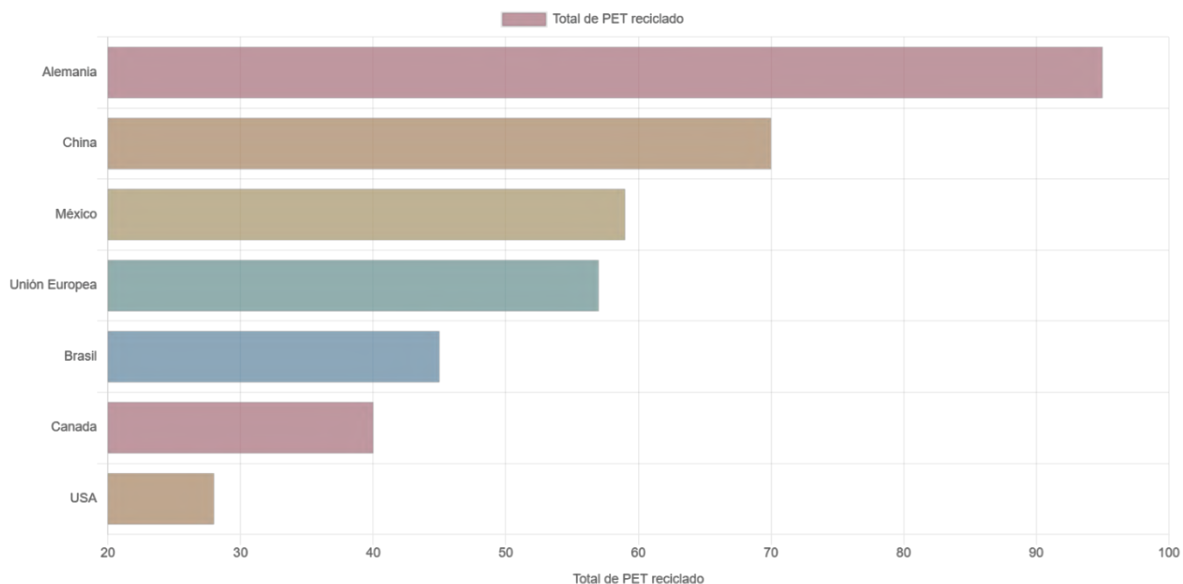
Como parte de la historia de los poliésteres termoplásticos, grupo al que pertenece el PET, se cuenta con el trabajo realizado por Carothers en el año de 1929. Los primeros experimentos realizados con los poliésteres pro-sintetizados se formaron a partir de ácido adípico y etilenglicol.

El químico Wallace Hume Carothers estudio primeramente los polímeros alifáticos que tienen un bajo punto de fusión y estos son solubles en disolventes orgánicos convencionales, de tales experimentos no hubo éxito a nivel industrial. Sin embargo, Wallace Carothers concentro más su atención hacia las poliamidas, teniendo como resultado (el PET).

La principal utilización del PET en México es en botellas de refresco de diferentes presentaciones (teniendo más del 50 por ciento del total producido), seguido del agua embotellada (con un 17 por ciento). Las diferentes marcas de empresas han creado publicidad a lo largo de los años, esto combinado con la falta de información y cultura de reciclaje, han generado que en México y el mundo se consuman refrescos y bebidas en botellas desechables como parte de un hábito natural de consumo. Las empresas que generan estas botellas participan muy poco en el reciclado de las mismas.

Hoy en día la recolección de botellas PET ha aumentado, permitiendo así dar otro uso a las botellas y otros plásticos. México encabeza la lista como líder en América en recolección y reciclaje PET.

TABLA I
MÉXICO LÍDER EN AMÉRICA EN RECOLECCIÓN Y RECICLAJE PET
FUENTE: SEMARNAT 2020, ECOCE 2021 [1]



II. METODOLOGÍA

Este proyecto surge con el objetivo de brindar soluciones a uno o varios problemas y satisfacer diversas necesidades, reemplazando tecnología obsoleta, optimizando procesos existentes, buscando mejorar su productividad y desarrollando productos capaces de reemplazar a otros por un precio más accesible y de mejor

calidad, con esto se pretende aprovechar oportunidades de negocios en el mercado de filamento PET para impresoras 3D, antes de iniciar el proyecto fueron consideradas algunas etapas de elaboración para este:

- Planificación: La planificación da comienzo desde el objetivo e hipótesis: rediseñar una máquina recicladora de botellas PET para la creación de filamento para impresoras 3D, así contribuimos a reducir los desechos sólidos (botellas PET) del 2%, en el Estado de México.
- Boceto inicial de la máquina: paso posterior al objetivo, es realizar un boceto inicial de la estructura que llevará la máquina, los tipos de mecanismos, y dispositivos eléctricos para su automatización. Este boceto será utilizado para realizar un inventario del material que utilizaremos para la elaboración del proyecto (véase Fig. 1).
- En el diseño de máquina en software de simulación: se realiza un diseño de máquina en software basándose en el boceto de inicio del proyecto, este software nos permitirá el armado de mecanismos, y la simulación del funcionamiento de estos. Se utilizará software SolidWorks. Con la utilización de este software se realizará diagrama explosivo para identificar cada parte y ubicación de las que está compuesta nuestra máquina.
- Para la elaboración de manuales: se realizará la elaboración de un manual de funcionamiento y un manual de mantenimiento en los cuales se detalla el funcionamiento de nuestra máquina y las acciones que se tienen que llevar a cabo para realizar un buen mantenimiento a la máquina respectivamente, junto con la opción de un mejoramiento a futuro.

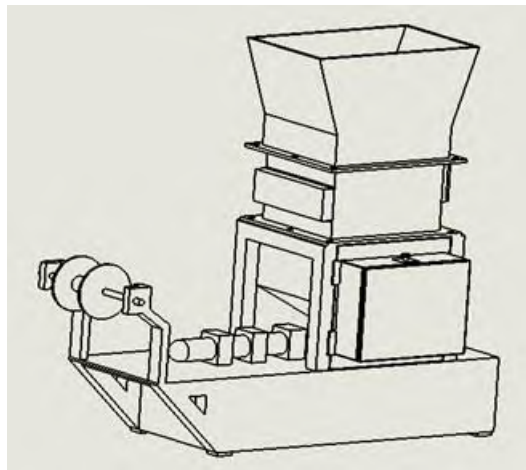


Fig. 1. Boceto inicial de la máquina.

Como proyecto de ingeniería se contempla que a futuro y con el avance de la tecnología se puedan implementar mejoras en la máquina permitiendo así mejorar su eficiencia en las cuestiones de producción y mantenimiento generando así futuras investigaciones e implementación de nuevos conocimientos, para la elaboración de este proyecto se utilizarán fundamentos de ingeniería que nos permitirán tener un diseño de máquina que cumpla con la normatividad vigente nacional e internacional, las necesidades del cliente, y los tiempos de productividad

III. CONSTRUCCIÓN

Tomando en cuenta el realizar un listado de materiales y conociendo el funcionamiento y diseño de la maquina en simulación, se realizará un inventario de materiales de inicio para comenzar el armado de la máquina. A continuación, se mencionan los materiales básicos considerados (véase Fig. 2):

4

1. PTR 1.25 in, C-18 acero 1018 (estructura).
2. Motorreductor SEW euro Drive de 1 HP. (trituradora)
3. Manorreductor Transtecno 0.75 HP (extrusor)
4. Lamina de acero 1020, de dimensiones 2m x 2m.
5. Tablero de control.
 - a. Botoneras de paro y arranque.
 - b. Balizas de indicación de accionamiento.
 - c. Interruptor termomagnético.
 - d. Seccionador de voltaje
 - e. Contactor de 220 Volts.
 - f. Variador de frecuencia GPD 505 MagneTek
 - g. Pirómetro y termopar 127 volts
6. Eje de acero inoxidable 316L, 1 in diámetro.
7. Extrusor de acero AISI 1020, 1.5 in diámetro, 15.75 in longitud.
8. Tolva de acero C-18, AISI 1020.
9. Contenedor de hojuela PET, acero AISI 1020, C-18.
10. Caja de molienda.
 - a. Placa de acero AISI 1020, 0.3125 in grosor
 - b. Cuchillas de acero AISI 1020, 0.1875 in grosor
 - c. Separadores de acero AISI 1020, 0.25 grosor
 - d. Criba de acero AISI 1020, 0.1875 grosor, barreno de 1.5 in

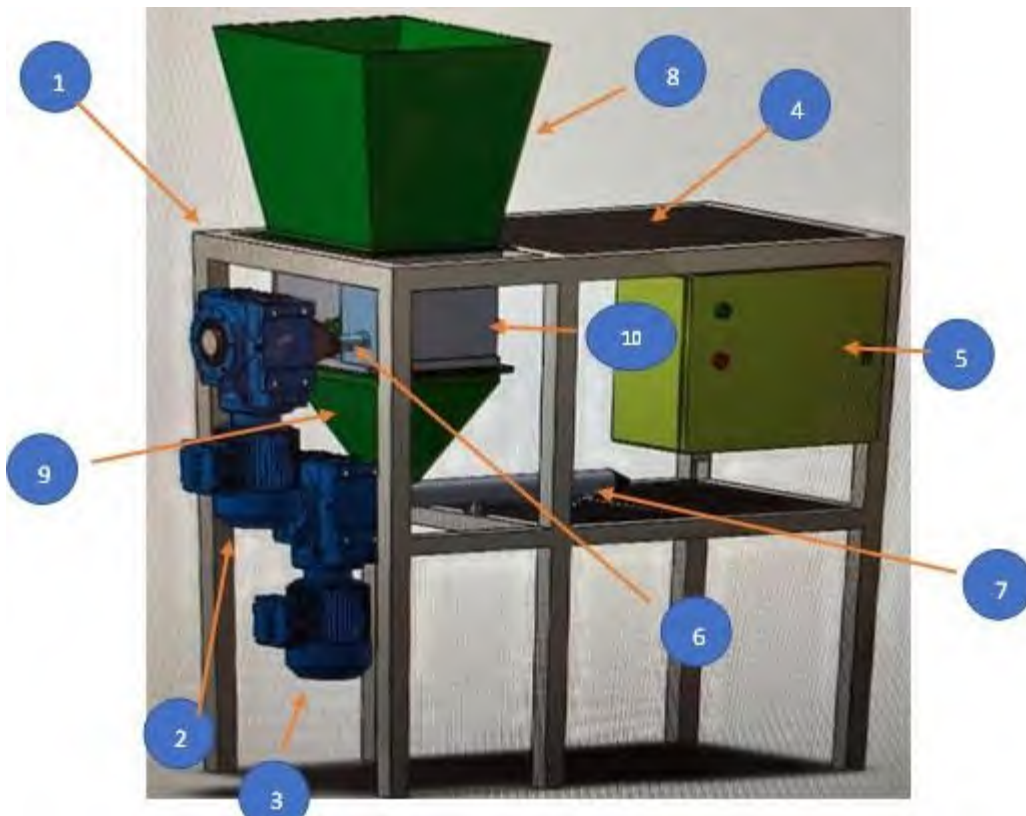


Fig. 2. Estructura de la máquina.

IV. RESULTADOS

Se realiza una validación de elementos que sufren un esfuerzo de tensión en la máquina, (Véase Fig. 3)

- 1. Eje motriz de 1 in, acero inoxidable 316L
- 2. Eje inducido 1 in, de acero AISI 1020
- 3. Cuchillas 0.1875 in de grosor en acero AISI 1020

Se realizó un estudio de esfuerzo de tensión en los ejes y un estudio de esfuerzo de torsión en las cuchillas. Se utilizó el software Solid Works 2019 módulo de simulación, análisis estático de torsión.

5

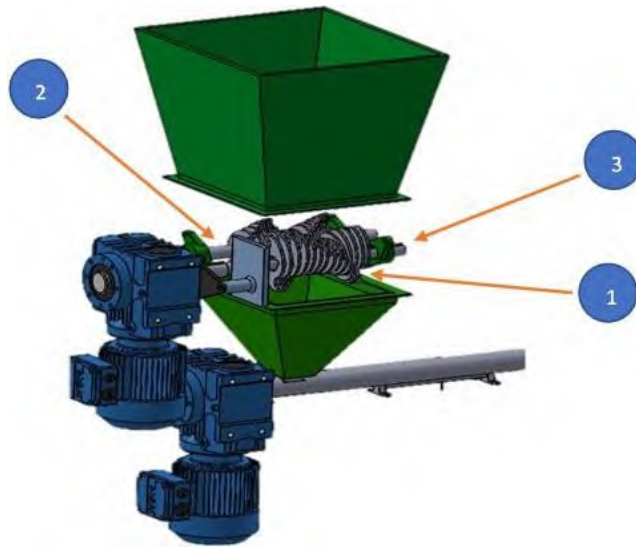


Fig. 3. Elementos de la máquina que sufren esfuerzo de tensión.

Para el elemento del eje motriz se realiza un análisis de Von Mises, con el software Solid Works 2019, módulo de simulación; análisis estático. Este análisis se realizó para conocer el momento y fuerza máximos que puede soportar el material de flechas y cuchillas, con base en esta teoría, podemos conocer dichos valores, con la cual podremos confirmar la selección de los materiales que se utilizaron. Esta validación es para conocer y validar la selección del material para el eje motriz, que es de acero inoxidable 316L. Con base en la tabla de propiedades mecánicas del acero inoxidable, según ASTM A240 y ASME SA-240, este acero tiene un límite elástico de 170 MPa. (véase Tabla 2).

TABLA 2
INFORMACIÓN DE PROPIEDADES DEL ACERO INOXIDABLE 316L. ALEACIÓN 316-317 CHILEXPO

| Propiedad | Propiedades Mecánicas Mínimas Requeridas Según ASTM A240 y ASME SA-240 | | |
|---|---|--------------|--------------|
| | 316 | 316L | 317L |
| Límite Elástico 0.2% Desplazamiento psi (MPa) | 30.000 (205) | 25.000 (170) | 30.000 (205) |
| Resistencia a la Tracción psi (MPa) | 75.000 (515) | 70.000 (485) | 75.000 (515) |
| Porcentaje de Elongación en 2"o 51 mm. | 40.0 | 40.0 | 40.0 |
| Dureza Max.Brinell (RB) | 217 (95) | 217 (95) | 217 (95) |

Las condiciones iniciales para el eje motriz son los siguientes (véase Fig.4).

- Se colocan los puntos de apoyo en las zonas marcadas con flechas verdes, ya que son las ubicaciones de la posición de las chumaceras en la caja de molienda.
- Se le aplica una fuerza a lo largo del mismo de 980.67 Pascales (flechas color morado).

6

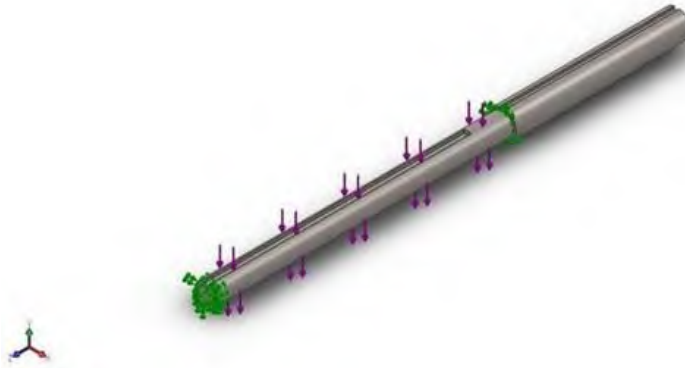


Fig. 4. Condiciones iniciales del eje motriz.

La teoría de fallo realizada en este software nos indica que el material dúctil acero inoxidable 316L es el correcto para la utilización de eje motriz.

Como resultados de este análisis realizado por el software Solid Works 2019, módulo de simulación, análisis estático, nos muestra (véase Fig.5):

- Esfuerzo máximo de tensión de 83.38 MPa. Mostrado de color rojo en la gráfica.
- Límite elástico máximo de 137.89 MPa. Mostrado en la flecha parte inferior de la gráfica.

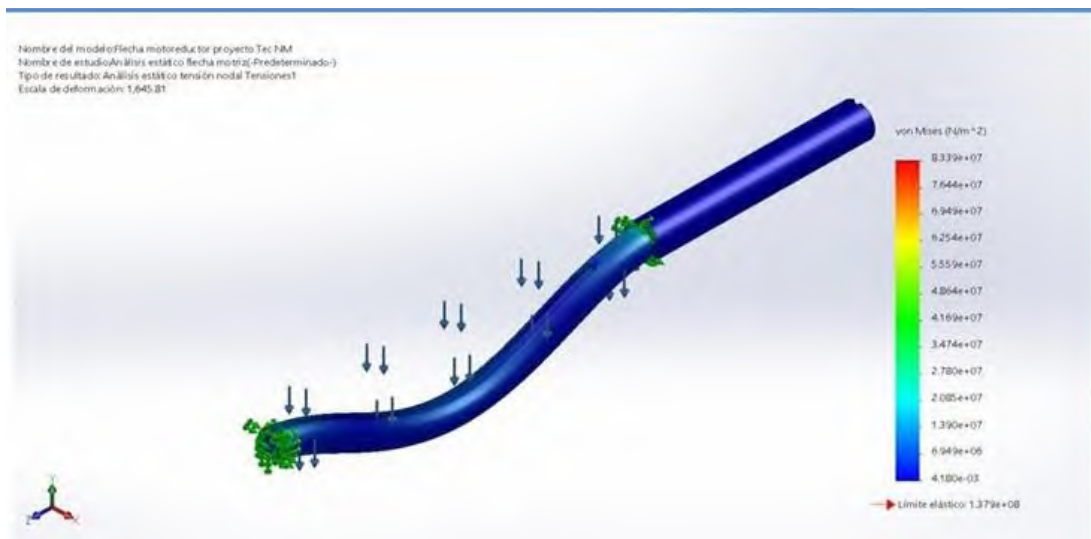


Fig. 5. Validación del elemento eje por Von Mises.

Este material es el adecuado ya que con base en los resultados obtenidos nos muestra que a lo largo del eje no se llegaría en ningún momento a su límite elástico, ya que el resultado arrojado por la simulación es de 137.9 MPa y comparando con la tabla 2 de información de propiedades del acero inoxidable 316L el límite elástico del acero inoxidable es de 170 MPa, (véase Tabla 2). Los resultados nos ayudan a saber cuál es el límite elástico del material con la carga aplicada, así como, en que zonas del material podría sufrir deformaciones o estar cerca del límite elástico teórico del material.

En cuestiones del elemento cuchillas se hace un análisis de esfuerzos de torsión en la sección que realizará el corte de las botellas, considerando que es la zona que estará bajo los esfuerzos constantes de trituración (véase Fig. 3), las consideraciones que se tomaron en cuenta fueron las siguientes:

- A. Material de la cuchilla: acero AISI 1020.
- B. Dimensiones de la cuchilla: longitud 4.6875 in, grosor 0.1875 in, barreno central 1 in
- C. Sujeción en la parte central de la cuchilla.
- D. Limite elástico acero AISI 1020: 343 MPa
- E. Aplicación de fuerza en extremos de la cuchilla de 980.67 Pascales

7
TABLA 3
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO AISI 1020, CIA.GENERAL DE ACEROS S.A

| PROPIEDADES MECÁNICAS | | | | | |
|----------------------------|-------------------------------|---------------------|----------------|---------------------|-----------------------|
| Estado de suministro | Resistencia a la tracción MPa | Limite elástico MPa | Alargamiento % | Reducción de área % | Dureza Brinell aprox. |
| Laminado en caliente | 441 | 196 | 25 | 45 | 140 / 180 |
| Normalizado | 490 - 588 | 343 | 30 | 55 | 150 |
| Recocido | 441 - 539 | 294 | 35 | 60 | 130 / 150 |
| Calibrado | 539 - 686 | 441 | 10 | 35 | 180 / 220 |
| Cementado, templado y rev. | 686 - 833 | 441 | 15 | 45 | ----- |

Las condiciones iniciales para la cuchilla son los siguientes (véase Fig.6).

- Los puntos de apoyo con los que cuenta el elemento están posicionados en las flechas de color verde
- Se le aplica un esfuerzo máximo de torsión en los extremos de la cuchilla de 980.67 Pascales (flechas color morado).

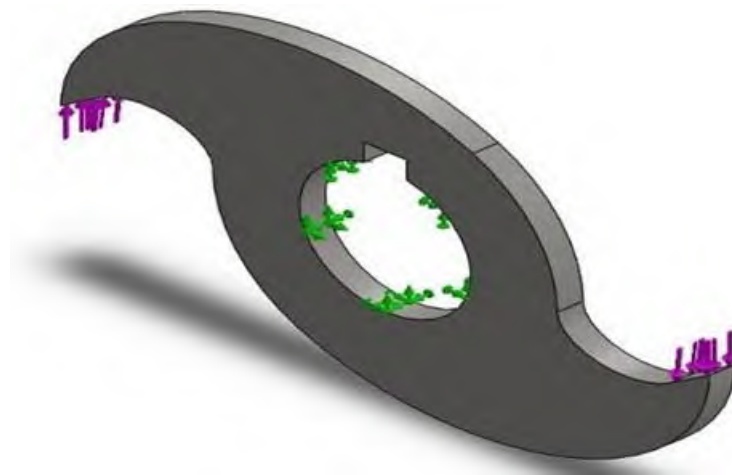


Fig. 6. Condiciones iniciales de la cuchilla de trituradora.

Como resultados del estudio arrojado por el Software Solid Works 2019, módulo de simulación, análisis estático de torsión (véase Fig.7):

- Esfuerzo máximo de tensión de 12.89 MPa. Visualizado en la parte roja de la gráfica.
- Limite elástico máximo 351 MPa. Visualizado con la flecha en la parte inferior de la gráfica.

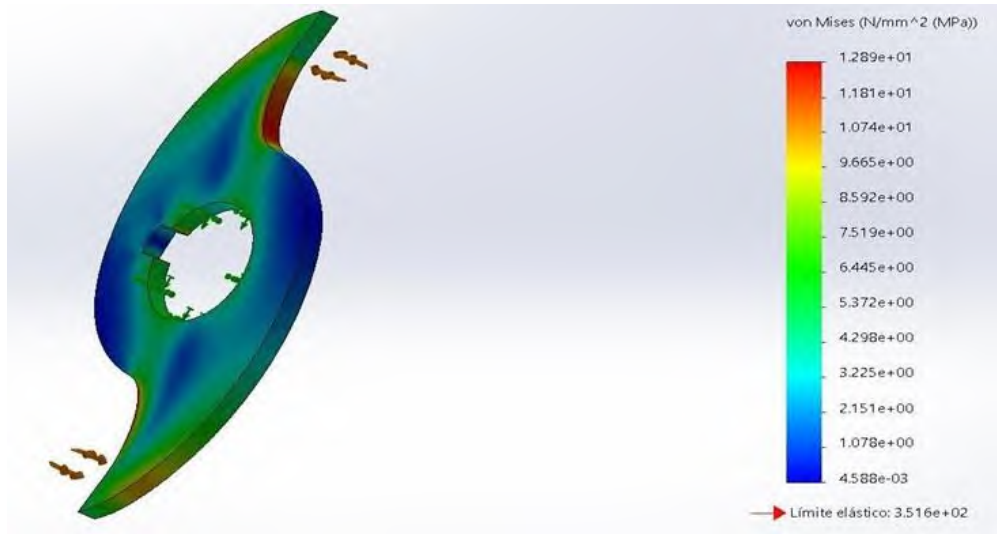


Fig. 7. Validación del elemento cuchilla.

Los resultados obtenidos para el elemento cuchilla nos indican que al someter a la cuchilla a un esfuerzo de torsión de 980.67 Pascales en la parte de corte de la cuchilla nos da como resultado un límite elástico de 351 MPa, este resultado se iguala con el límite elástico preestablecido por la tabla de propiedades mecánicas del acero AISI 1020, que es de 343 MPa, (véase Tabla 3): Tomando en cuenta los resultados, el material está en un punto vulnerable de operación, lo cual para su implementación se considera tratar el elemento con un proceso térmico, el proceso térmico que se realizara a dicho elemento sería un templado martensítico, este proceso consiste en calentar el material llevándolo a una temperatura elevada para posteriormente realizar un enfriamiento rápido dentro de un aceite, este proceso nos permitirá tener un aumento significativo en las propiedades mecánicas del acero. Para un análisis futuro se tendrá que parametrizar los nuevos datos del elemento permitiendo así que el análisis se realice tomando en cuenta los datos reales.

En la etapa de extrusor se realiza un análisis térmico con ayuda del software Solid Works 2019 módulo de simulación avanzada, térmico.

En el elemento barril o cañón de extrusor, que está diseñado con un material de acero AISI 1020, se aplicó una temperatura de 260 °C en la parte exterior del barril, que es la ubicación de contacto de las resistencias cerámicas de 660 W, (véase Fig.8).

Las condiciones principales que se consideraron para esta prueba fueron:

- A. Barril de extrusor de acero AISI 1020, longitud de 45 cm, diámetro de 1.25 in
- B. Conductividad térmica del acero AISI 1020 de 51.9 W/(m*k)
- C. 4 resistencias cerámicas de 660 watts, diámetro 1.25
- D. Elevación uniforme de temperatura a lo largo del extrusor a una temperatura de 260°C

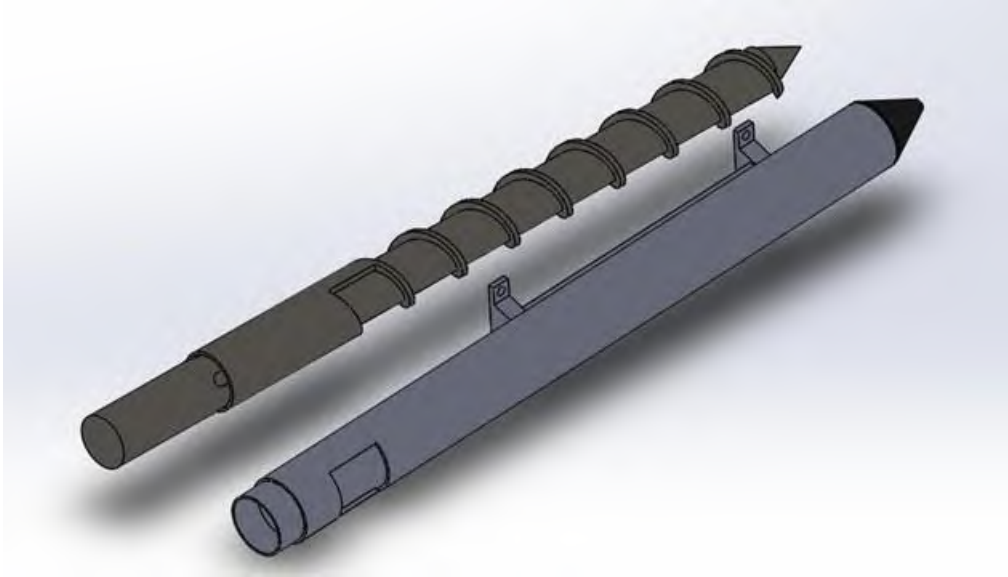


Fig. 8. Vista explosionada de extrusor.

Como resultado una temperatura máxima en el barril de 260 °C, mostrada en la gráfica del software con color rojo, (véase Fig.9). mostrando que el material de acero AISI 1020, no tiene una deformación al calentamiento, la temperatura de fusión del acero AISI 1020 es de: 1400°C, (véase Tabla 4), validando que el material seleccionado para este elemento es el adecuado debido a los propiedades físicas que este posee y a la aplicación de uso pensada, este deberá contar con una protección exterior que recubra lo largo del extrusor para evitar el contacto por el usuario, ya que este elemento se encuentra a una temperatura que puede ocasionar quemaduras a las personas que estén cerca del extrusor.

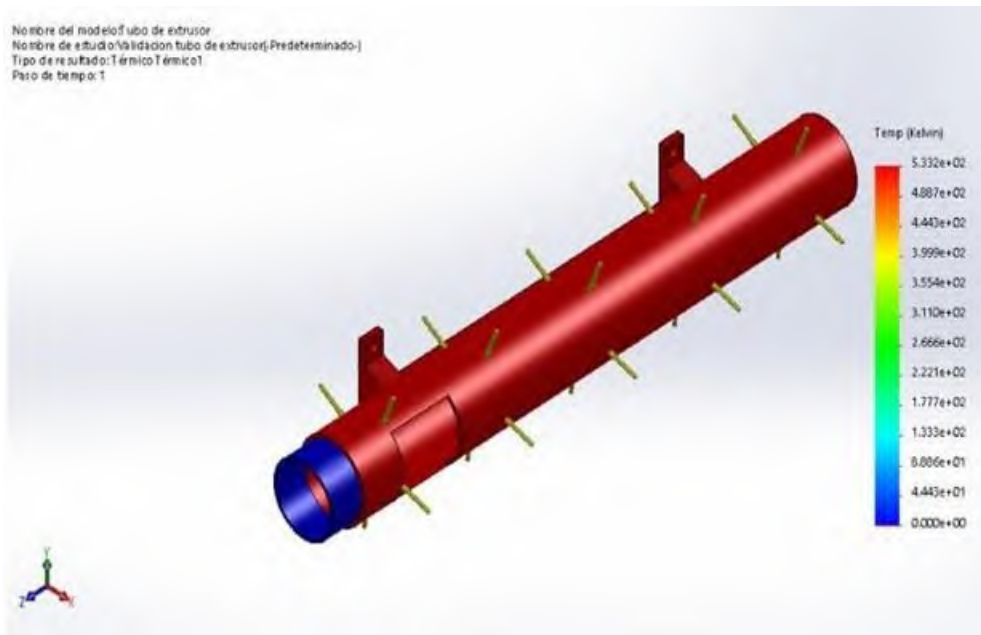


Fig. 9. Resultado de validación de temperatura para el barril de extrusión.

TABLA 4
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO AISI 1020, CIA.GENERAL DE ACEROS S.A

| METALES | PUNTO DE FUSION |
|--------------------------|---------------------------|
| Estaño | 240°C (450°F) |
| Plomo | 340°C (650°F) |
| Cinc | 420°C (787°F) |
| Aluminio | 620°-650°C (1150°-1200°F) |
| Bronce | 880°-920°C (1620°-1680°F) |
| Latón | 930°-980°C (1700°-1800°F) |
| Plata | 960°C (1760°F) |
| Cobre | 1050°C (1980°F) |
| Hierro fundido | 1220°C (2250°F) |
| Metal monel | 1340°C (2450°F) |
| Acero de alto carbono | 1370°C (2500°F) |
| Acero medio para carbono | 1430°C (2600°F) |
| Acero inoxidable | 1430°C (2600°F) |
| Níquel | 1450°C (2640°F) |
| Acero de bajo carbono | 1510°C (2750°F) |
| Hierro forjado | 1593°C (2900°F) |
| Tungsteno | 3396°C (6170°F) |

Para la validación de temperatura del elemento husillo se tiene en consideración aplicar la temperatura máxima en la longitud total de la pieza (véase Fig. 10), ya que será el medio de transportación de la hojuela fundida, este elemento cuenta con las siguientes características:

- A. Material: acero AISI 1020.
- B. Conductividad térmica del acero AISI 1020 de 51.9 W/(m*k)
- C. Se aplicará temperatura de manera uniforme de 260°C.

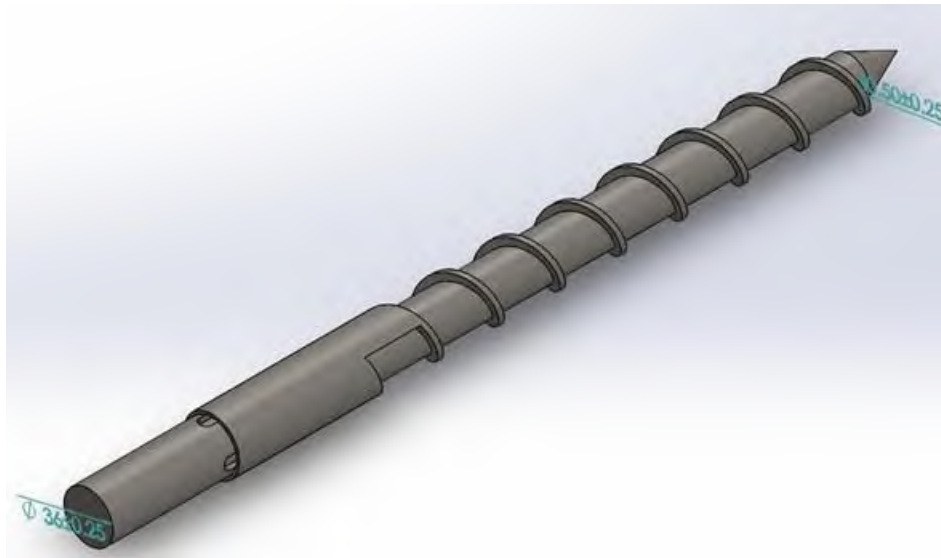


Fig. 10. Elemento husillo.

Los resultados obtenidos en el análisis realizado con el software Solid Works 2019 módulo de simulación avanzada, térmico, nos indican una temperatura máxima en el cuerpo del husillo de 260 °C, mostrada en la parte roja de la gráfica (véase Fig. 11), comprobando que el material seleccionado, acero AISI 1020 es el adecuado para su utilización, ya que no existe deformación en el material, al no superar el punto de fusión del acero AISI 1020. (véase Tabla 4).

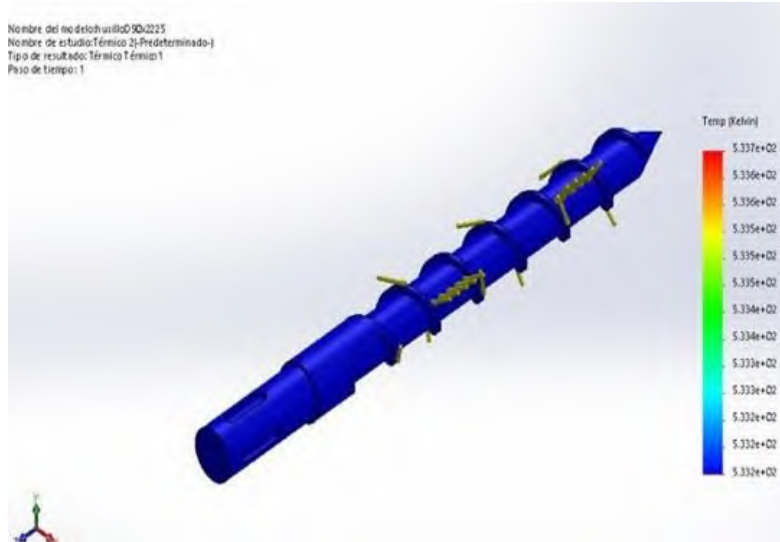


Fig. 11. Validación de temperatura al elemento husillo.

En el elemento boquilla de extrusión, se realizó un análisis de temperatura en la parte interior de la boquilla, utilizando el software Solid Works 2019 módulo de simulación avanzada, térmico, (véase Fig. 12), tomando en cuenta que será el medio de expulsión de la hojuela fundida en una boquilla de diámetro de 1.75 mm. Las consideraciones que se tomaron en cuenta son las siguientes:

- I. Material de fabricación: Acero AISI 1020.
- II. Conductividad térmica de 52 W/ (m.K).
- III. Temperatura aplicada 260°C.

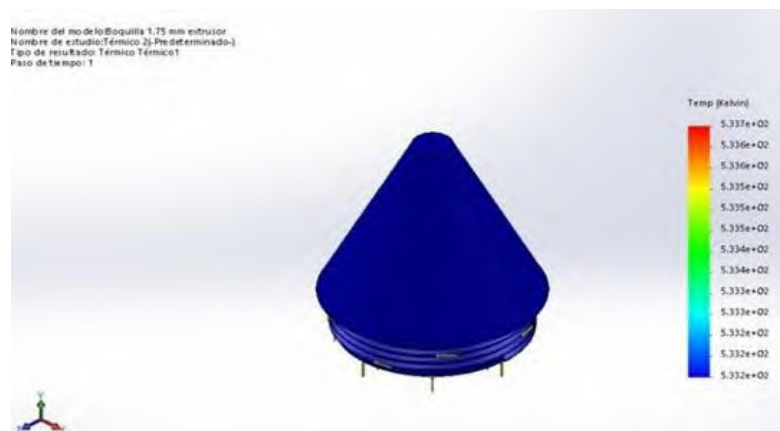


Fig. 12. Validación de temperatura para la boquilla de extrusión.

Los resultados obtenidos indican que la temperatura máxima es de 260 °C, observada en la parte roja de la gráfica, validando que el material de acero AISI 1020, con el que se fabricó la boquilla es el adecuado para la función de extrusor.

V. CONCLUSIONES

Los análisis que se realizaron en este artículo con el software Solid Works nos proporcionan datos e información que utilizaremos para conocer el comportamiento de los materiales que se pretenden utilizar en la etapa de trituración y extrusión de este proyecto. Analizando los resultados obtenidos, después de someter una simulación de esfuerzos de torsión inducidos al eje motriz y cuchillas, de material acero AISI 1020, se tiene un funcionamiento correcto de la etapa de trituración ya que existe una deformación permisible, que no sobrepasa el límite elástico del material. Como mejora del elemento eje y cuchilla, se sugiere cambiar la geometría de la parte central para evitar concentración de esfuerzos en el cuñero y prevenir un deslizamiento. Para un análisis futuro se parametrizará los nuevos datos.

En el extrusor, la simulación de aumento de temperatura en barril, boquilla y husillo nos indica que el material de fabricación del extrusor, acero AISI 1020, funciona correctamente en comparación con otros aceros en su composición química, como el AISI 1018 que contiene un 0.18% de carbono y hierro contra 0.20% del acero AISI 1020. Esta diferencia en la simulación nos muestra menos cambios estructurales por esfuerzos térmicos, ya que la elevación de temperatura no afecta la composición del material, por lo tanto, existirá un menor desgaste al extrudir plástico fundido.

REFERENCIAS

- [1] CP Plásticos, *CP Plásticos*, 2022. <http://www.cpplasticos.mx/>
- [2] SolidWorks, "Criterio de máxima tensión de Von Mises – 2018", Ayuda de SolidWorks, 2022. https://help.solidworks.com/2018/spanish/SolidWorks/cworks/r_maximum_von_mises_stress_criterion.htm
- [3] Acero AISI/SAE 1020, 2022. (2020, abril 18). Cía. General de Aceros S.A. <https://www.cga.com.co/producto/acero-aisi-sae-1020/>
- [4] Nexeo Plastics, *Propiedades térmicas y mecánicas del PET reciclado y sus mezclas*, 2007. <https://www.plastico.com/es/noticias/propiedades-termicas-y-mecanicas-del-pet-reciclado-y-sus-mezclas>
- [5] A. Flores, "Extrusor de polímeros, ¿qué es y cómo funciona?", +*Ciencia*, no. 22, 2022. <https://www.anahuac.mx/mexico/noticias/Extrusor-de-polimeros-que-es-y-como-funciona>
- [6] Tractermia, *Templado del Acero*, 2022. <https://www.tractermia.com/templado-del-acero/>
- [7] F. Delgado, *Acero inoxidable. Sus propiedades y características*, 2019. <https://www.masterlogistica.es/acero-inoxidable-sus-propiedades-y-caracteristicas/>
- [8] M. Heat, "Resistências eléctricas para extrusoras", *Maxpolheaters*. 2022. <https://www.maxpolheaters.com/blog-es/Variedad-en-las-resistencias-el%C3%A9ctricas-para-extrusoras-55.html>
- [9] Cía. General de Aceros, *Acero Grado Ingeniería*, 2022. <https://www.cga.com.co/>
- [10] Yaskawa America, *GPD 505 Manual técnico*, Magnetek, 2022. <https://www.yaskawa.com/downloads/search-index/details?showType=details&docnum=TM4505>
- [11] ChileExpo, *Aleación 316-317*, 2022. <https://www.chileexpo.com/wp-content/uploads/2019/06/316-317.pdf>
- [12] E. Hoffman, *Manual del taller para estudiantes y operarios*, México: Limusa, 2006.
- [13] Materiales Industriales 3IV, *Fundición*, 2022. <https://sites.google.com/site/materialesindustriales3iv/home/fundicion>
- [14] R. Budynas, J. Keith, *Diseño de Ingeniería mecánica*, 8ª ed., México: Mc Graw Hill, 2010.
- [15] Y. A. Cengel, M. A. Boles, *Termodinámica*, 7ª ed., México: Mc Graw Hill, 2010.
- [16] Norma Oficial Mexicana, *NOM-004-STPS-1999, Sistemas de protección y dispositivos de seguridad en la maquinaria y equipo que se utilice en los centros de trabajo*, México, 1999.
- [17] The Food Tech, *Recicla Estado de México sólo 2% del PET que consume*, 2011. <https://thefoodtech.com/historico/recicla-estado-de-mexico-solo-2-del-pet-que-consume/>
- [18] Corpmetal, *Acero 1018 y el 1020 y sus características*, 2022. <https://corpmetales.com/acero-1018-1020-caracteristicas/>