



Análisis de Materiales PLA y ABS Impresos en 3D, Sometidos a Compresión y Estrés Térmico

Serrano-Hernández, A¹✉; Machado-Díaz, E¹; Vaquera-González, E¹

Datos de Adscripción:

¹ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.
División de Ingeniería en Sistemas Automotrices. Av. Tecnológico No. 1555 Sur,
Periférico Gómez – Lerdo Km 14.5, C. P. 35150, Lerdo, Durango, México.

✉ arturo.sh@itslerdo.edu.mx

Resumen - La implementación del proceso de fabricación con impresoras 3D como nueva tecnología, ha revolucionado a nivel mundial dentro de la industria en general, la forma en que se diseñan, prototipan y fabrican productos. Esta tecnología ha permitido flexibilidad en los procesos de fabricación y ha transformado la industria al ofrecer soluciones eficientes y rentables. El objetivo del proyecto fue evaluar la viabilidad de sustituir materiales de piezas mecánicas plásticas de uso industrial (Nylamid), por otros materiales plásticos pero impresos, haciendo pruebas inicialmente con PLA y ABS con distintos niveles de relleno. A través de la recopilación de datos sobre piezas sometidas a distintas cargas en entornos industriales, es que se diseñó un experimento en el que se probaron distintos materiales expuestos a condiciones similares de la industria, pero de forma controlada. Este intercambio se realizó considerando implicaciones económicas y de tiempos de fabricación, para determinar la viabilidad de la sustitución del material para las piezas mecánicas. El experimento constó de pruebas en una mufla (horno), los materiales empleados fueron PLA y ABS y además se sometieron las muestras a una carga de 4.7Kg, evaluando su comportamiento y registrando los datos correspondientes a la deformación según la temperatura de control por tiempo determinado. Los resultados obtenidos del experimento ayudaron a determinar la viabilidad de la sustitución de material, sin comprometer la resistencia de las piezas mecánicas. Esto sugiere, que es posible utilizar materiales alternativos en la fabricación de estas piezas, lo que podría traducirse en posibles beneficios económicos.

Palabras Clave: Deformaciones, Esfuerzos, Impresión 3D, Materiales.

Abstract - The implementation of the manufacturing process with 3D printers as a new technology has revolutionized the way products are designed, prototyped, and manufactured on a global scale within the industry in general. This technology has allowed flexibility in manufacturing processes and has transformed the industry by offering efficient and cost-effective solutions. The objective of the project was to evaluate the feasibility of replacing materials for industrial-use plastic mechanical parts (Nylamid) with other printed plastic materials, initially testing with PLA and ABS with different infill levels. Through the collection of data on parts subjected to various loads in industrial environments, an experiment was designed in

which different materials exposed to conditions similar to the industry but in a controlled manner were tested. This exchange was carried out considering economic and manufacturing time implications to determine the feasibility of substituting the material for mechanical parts. The experiment consisted of tests in a muffle furnace, the materials used were PLA and ABS, and the samples were subjected to a 4.7Kg load, evaluating their behavior and recording the corresponding deformation data according to the control temperature for a determined time. The results obtained from the experiment helped determine the feasibility of the material substitution without compromising the strength of the mechanical parts. This suggests that it is possible to use alternative materials in the manufacture of these parts, which could translate into potential economic benefits.

Keywords: 3D Printing, Deformations, Materials, Stresses.

I. INTRODUCCIÓN

En el ámbito industrial, la calidad y durabilidad de las piezas plásticas de desgaste son aspectos cruciales que influyen directamente en la eficiencia y seguridad de los procesos.

La resistencia a la compresión y a las condiciones térmicas son dos propiedades de exposición común a este tipo de piezas, la resistencia a las mismas es un factor buscado para garantizar un rendimiento óptimo en entornos de uso exigente. La evaluación de estas características mediante pruebas específicas, se convierte en un componente esencial para asegurar la fiabilidad y longevidad de los componentes plásticos utilizados en aplicaciones industriales.

Existen diversos procesos industriales pueden fácilmente intercambiar sus piezas plásticas por piezas impresas, como el caso de piezas creadas por procesos de fundición o por moldeo, entre ellos inyección, compresión, moldeo rotacional, o bien por procesos de remoción de material.

Algunos autores dan muestra de sus experimentos en áreas específicas, tal es el caso de David, Rosello Cruz (2022) quien experimentó con la extrapolación del proceso de impresión para aplicarse en el sector de la construcción, donde concluye que para dicho sector aún se encuentran en una fase de desarrollo inicial. Esto se ve reflejado en la calidad de las estructuras, la cual no es del todo óptima y queda alejada de las construcciones realizadas mediante los métodos tradicionales en cuanto a calidad superficial y de acondicionamiento.

En Argentina, ya desde 2018 se veía la evolución del campo de aplicación de la impresión 3D, siendo así que Roberto Antoni López (2018) enmarcó cuales giros guiaban dicho desarrollo, concluyendo que el ramo médico ha tomado el primer lugar como

campo de aplicación en dicho país y otros como Estados Unidos y Reino Unido, dejando en segundo plano al ramo industrial aunque no menos importante, pero si notando muy por debajo a ramas como la educación, arquitectura, juguetería, milicia, otros.

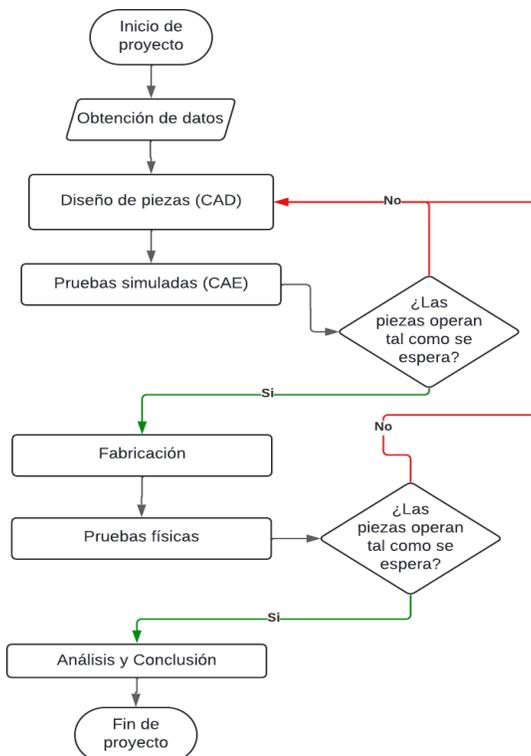
Respecto al ramo industrial y en apego a normativas, se han realizado estudios de resistencia de materiales impresos, en el caso de Rome Muñoz y otros (Muñoz et al, 2015), realizaron pruebas de resistencia de materiales de acuerdo con la norma ASTM D638-10, comprando piezas impresas con PLA contra resina sintética con material orgánico (Laywood). Obteniendo que la resistencia mecánica es mayor en materiales impresos.

Por lo anterior mencionado, es que se diseñó un experimento que proporcione información de apoyo en la toma de decisión, respecto a la selección de materiales, particularmente la comparativa del Nylamid y ABS entre otros y procesos de fabricación respecto a su uso, la impresión sustituyendo a piezas plásticas maquinadas .

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

Como parte de un proceso sistemático que guíe el proceso de estudio y la obtención de conocimiento, es que se estableció un método alineado con el proceso de diseño mecánico clásico mostrado en la figura 1.

Figura 1
Diagrama de proceso metodológico alineado al diseño mecánico.



2.1 Obtención de datos

A raíz de una vinculación establecida por parte del Instituto Tecnológico Superior de Lerdo (ITSL) con el sector industrial, es que se hizo saber acerca del uso de piezas mecánicas plásticas (Nylamid) como piezas de desgaste en procesos industriales, un ejemplo de ellas se muestra en la figura 2, presentándose problemáticas con el proceso de fabricación (maquinado), principalmente referentes a tiempos de fabricación y entrega de productos. Generando de ahí la idea de experimentación para un intercambio del proceso de fabricación y materiales.

Figura 2
Pieza de análisis "Rulli para rodillo"



Las restricciones propuestas son que los materiales a emplear no reduzcan su resistencia, reduzcan costo de fabricación entre otras, ya que actualmente las piezas cumplen las con la función deseada. Los parámetros o condiciones de operación se muestran en la tabla1.

Tabla 1
Condiciones de operación de la pieza de uso industrial de referencia

Envasadora RP-16	
Pieza	Rulli para rodillo
Material	Nylamid 901
Temp. de trabajo	90°C
Aplicación	Separador de piezas de contacto
Costo unitario	\$200.00 MXN
Tiempo de fabricación	--
Entorno	Exposición a sosa, ácido y agua caliente
Fuerzas	Fricción, fuerza de choque

La propuesta es mantener la eficiencia operativa del material y en la medida de lo posible reducir costos y tiempos de fabricación y/o entrega del producto.

Con base a experimentación con rigurosas pruebas de un proceso alternativo y variación en los materiales de fabricación, darán un panorama más amplio para la toma de decisión respecto al cambio de proceso y materiales a implementarse como alternativa al proceso actual. Se muestran algunas propiedades mecánicas de materiales de análisis propuestos y otros de referencia en la tabla 2.

Tabla 2
Propiedades mecánicas de algunos materiales plásticos

	PLA	ABS	PETG	Nylamid
Temp. Fusión (°C)	210	230	240	215
Temp. Operación (°C)	52	88	74	93
Densidad (g/cm ³)	1.24	1.07	1.27	1.14
Resistencia a la tensión (MPa)	55	43	49	70
Coefficiente elasticidad(GPa)	3.4	2	1.2	2.75
Resistencia expansión(μm/m – K)	68	88	60	100

* Algarni, M., & Ghazali, S. (2021), Strauß, M. (2023), Aceros Levinson. (2018).

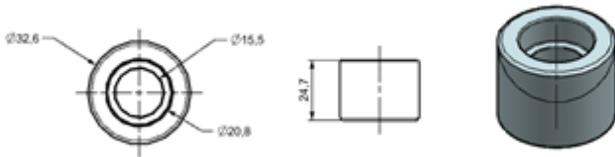
2.2 CAD

En la etapa de Diseño Asistido por Computadora (CAD). El diseñador representa gráficamente piezas o productos en forma digital, utilizando software especializado de modelado 3D, a través de entidades como líneas, arcos, círculos, polígonos, entre otros. El dibujo puede representarse en 2 o 3 dimensiones, en este último caso se puede realizar en forma de superficies o sólidos, con la ventaja que el usuario puede conservar el diseño en formato digital y editarlo para mejorarlo o para utilizar alguno de sus componentes en el diseño de una nueva pieza (Carrasco Garcia, J. C., 2006).

En el proyecto desarrollado se usó software especializado de diseño paramétrico (NX12 de SIEMES), como apoyo para el desarrollo del proyecto, particularmente para su análisis de ingeniería y por la facilidad de cambio de formato para su posterior fabricación por impresión 3D, mostrando en la figura 3 una de las representaciones gráficas obtenidas por software de las piezas con las que se experimentará.

Figura 3

Modelado 3D y obtención de plano constructivo por software. Plano obtenido del software NX de SIEMENS versión 12.



2.3 CAE

La Ingeniería Asistida por Computadora (CAE), simula determinadas condiciones a través de variables de control, para determinar su efecto, sobre el elemento diseñado, con la finalidad de llegar a una forma geométrica óptima para determinadas condiciones específicas. Utilizado como modelado de pruebas no destructivas. La base del CAE hace referencia a un segundo término, Análisis por Elementos Finitos (FEA), que permite analizar distintas opciones de diseño o materiales de forma rápida.

El concepto del análisis por elementos finitos, radica en sustituir la estructura continua real por una estructura idealizada equivalente, compuesta por un número finito de partes discretas, por medio de un mallado (bidimensionales; cuadriláteros y triángulos; tridimensionales: hexaedros y tetraedros), al cual se aplican cargas en los nodos de los elementos límite del modelo, después del cual empleando teoremas de energía (relación entre fuerzas actuantes en los nodos y sus desplazamientos ley de Hooke, módulo de Young, módulo de Poisson, etc.), se llega a derivar una matriz de rigidez. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es regido por un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito (Rojas Lazo, O., & Rojas Rojas, L. 2006).

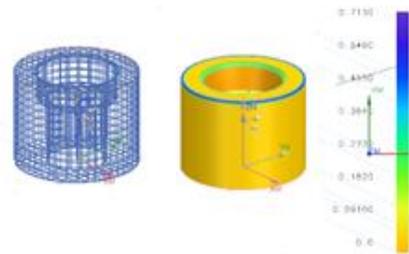
Los datos postprocesados permiten una visualización gráfica en una escala de colores, animaciones, esquemas, etc., como se muestra en la figura 4, para mostrar los esfuerzos y las

deformaciones resultantes. Permitiendo evaluar rápidamente zonas críticas del diseño y analizar si la pieza soportará la tensión de operación sin deformarse más de lo permitido por el diseño.

Para las pruebas simuladas, se hizo uso del mismo software NX, en el cual se establecieron condiciones de operación. Siendo útil para analizar el comportamiento de las piezas previo a su fabricación, y tener una referencia adicional de evaluación del rendimiento de las piezas.

Figura 4

Pieza analizada por software usando FEA. Simulación realizada en el software NX de SIEMENS versión 12.

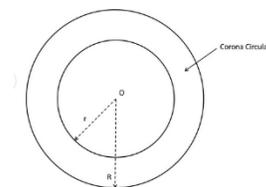


2.4 Cálculo

Otra forma de tener referencias o estimaciones de las reacciones de las piezas es a través de un cálculo simplificado, para el caso particular de esfuerzos a compresión aplicado sobre un anillo circular, correspondiendo con su sección transversal de aplicación como se muestra en la figura 5.

Figura 5

Sección transversal donde se aplica la carga a compresión



El primer paso requerido es realizar la conversión de la masa de prueba propuesta a Peso, ara que las unidades correspondan al Sistema Internacional (N)

$$F = ma = mg \quad (1)$$

El segundo paso requiere obtener el esfuerzo de operación, o la que se someterá la pieza dada.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi(R^2 - r^2)} \quad (2)$$

Como tercer paso se obtiene el factor de seguridad, comparando el esfuerzo de operación, en relación a la resistencia del material.

$$F.S = \frac{S_t}{\sigma} \quad (3)$$



De forma teórica las deformaciones se pueden estimar teniendo la información del esfuerzo de operación y el módulo de elasticidad, a través de la ley de Hooke.

$$\sigma = E \varepsilon \quad (4)$$

Derivando en el despeje de la deformación unitaria, la cual se asemeja a la obtención práctica de la deformación, lo que es más conveniente hacerlo a través de las mediciones directas antes y después de la aplicación de la carga

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_o}{L_o} = \frac{\delta}{L_o} \quad (5)$$

La dilatación térmica de los materiales se calcula en función de la variación de la temperatura y el coeficiente de expansión térmica.

$$\delta_t = \alpha \Delta T L \quad (6)$$

Combinando las deformaciones producidas por el esfuerzo a compresión y la dilatación térmica, es la deformación total

$$\delta_T = \delta + \delta_t \quad (7)$$

Igualando la deformación total con las variaciones iniciales se obtiene:

$$\frac{\sigma}{E} + \alpha \Delta T L = \frac{\sigma_i}{E} + \alpha \Delta T_i L \quad (8)$$

2.5 Fabricación

1) Maquinado CNC

Un centro de maquinado es una máquina altamente automatizada capaz de realizar múltiples operaciones de remoción de material en una instalación con control numérico computarizado (CNC) donde la intervención del operador es mínima.

Las operaciones más comunes de maquinado son aquellas que usan herramientas de corte rotatorio, o bien un instrumental de maquinaria que permita el giro del material ante a un cortador fijo.

Las propiedades del material de trabajo son de lo más importante para el éxito de la operación de remoción de material. Estas propiedades del trabajo de corte se resumen a menudo en el término "maquinabilidad".

Para evaluar la maquinabilidad se usan varios criterios, donde los más importantes son: la vida de la herramienta, las fuerzas y potencia, el acabado superficial y la facilidad de eliminación de la viruta. El buen desempeño del maquinado no depende sólo del material, también al tipo de operación de maquinado, a las herramientas y a las condiciones de corte.

El Nylamid es una muy buena opción como material para el trabajo deseado, particularmente el denominado 901 color azul, que incrementa la estabilidad térmica, soportando temperaturas de hasta 127°C sin perder su buena maquinabilidad. Y respecto

al proceso de fabricación es rápido, habiendo obtenido los tiempos de maquinado a través de simulación por software como se muestra en la figura 6.

Figura 6

Simulación de maquinado de piezas de desgaste por CNC. Simulación de maquinado realizada en el software NX de SIEMENS versión 12



2) Manufactura aditiva; Impresión 3D por deposición de material fundido (FDM)

Durante el proceso de impresión 3D se aportan y adhieren de forma controlada diferentes tipos de materiales para crear objetos a partir de los datos de un modelo en tres dimensiones, normalmente capa sobre capa (ASTM International 203AD). Se muestra en la figura 7 el tipo de impresora empleada para la experimentación, así como el software respectivo de la marca (ultimaker cura). La impresión facilita la creación de objetos con geometrías intrincadas, cambios y personalizaciones llegando a poder fabricar en un solo paso diseños complejos, se produce menor desperdicio de material (al prescindir de moldes y de algunos postprocesos sobre piezas) por lo que la innovación en producto se acelera y simplifica ofreciendo no solo ventajas en costes, sino también en barreras a la entrada, en las cadenas de suministro y en la participación del cliente en el diseño (Weller, Kleer, y Piller 2015). Siendo la simplicidad de la logística de la fabricación aditiva, representada en la figura 8 comparando contra un proceso tradicional.

Figura 7

Proceso de fabricación aditiva

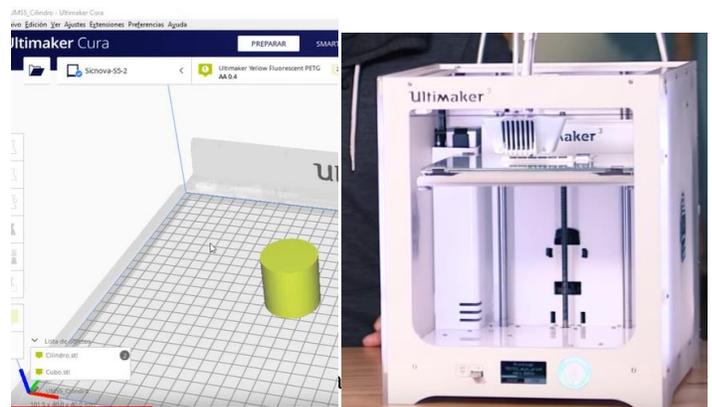
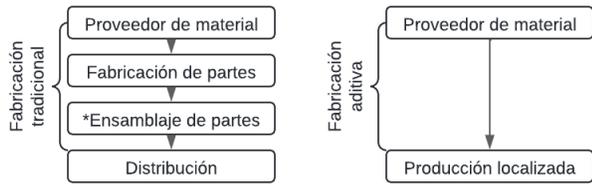




Figura 8
Comparativa de cadena logística en fabricación y entrega de producto



Respecto a los tiempos de maquinado e impresión 3d, fueron estimados a través de software, NX en su aplicación de fabricación y cura de ultimaker, de donde se obtuvieron los tiempos de fabricación estimados, representando en la figura 9 y figura 10 la forma que el software proporciona la información de dichos tiempos, y en la tabla 3, la recopilación de información comparando los tiempos de impresión respecto a los tiempos de maquinado.

Figura 9
Tiempo de maquinado estimado a través de software. Imagen y obtención de datos obtenidas de la simulación de maquinado realizada en el software NX de SIEMENS versión 12.



Figura 10
Tiempo de impresiones estimado a través de software. Imagen y datos obtenidos del software Cura Versión 5.5.0 de Ultimaker.

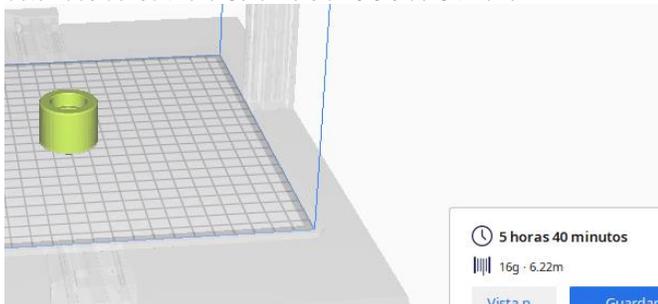


Tabla 3
Tiempos de fabricación – entrega de producto

Maquinado CNC		21min 14seg		
Impresión 3D	PLA	ABS	PETG	
Tiempo total (hr)100%	5hrs 40min	5hrs 40 min	5 hrs 40min	
75%	3hrs	3hrs 15min	3hrs 15min	
	15min			
50%	2hrs 34min	2hrs 34min	2hrs 34min	
25%	1hrs	1hrs	1hrs	
	55min	55min	55min	

PLA: El ácido láctico, de origen vegetal, es utilizado ampliamente en la industria alimenticia, química, farmacéutica, del plástico, textil, agricultura, alimentación animal, entre otros. Es un biopolímero termoplástico cuya molécula precursora es el ácido láctico. Debido a su biodegradabilidad, propiedades de barrera y biocompatibilidad, este biopolímero ha encontrado numerosas aplicaciones industriales. (Serna C. L, Rodríguez de S. A, Albán A. F 2024)

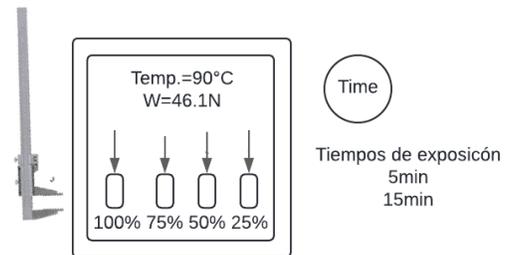
ABS: El Acrilonitrilo Butadieno Estireno) derivado del petróleo, es una mezcla de un copolímero vítreo (estireno - acrilonitrilo) y un compuesto elástico, principalmente el polímero de butadieno. La estructura con la fase elastómera del polibutadieno (forma de burbujas) inmersa en una dura y rígida matriz SAN, se destaca por combinar dos propiedades muy importantes como: la resistencia a la tracción y la resistencia al impacto en un mismo material, además de es un material liviano. (Vinicio, M. o. J. 2016).

PETG: Es producto de la glicolización del PET. Este proceso consiste en agregar ciclohexano di metanol y reemplazar al etilenglicol, consiguiendo una cadena de átomos más larga. Con esto se consigue retardar la cristalización cuando las piezas fabricadas en PETG son sometidas a esfuerzo. Además, PET adicionado con glicol aumenta la flexibilidad del polímero y reduce su capacidad higroscópica con respecto al PET (AMFG, 2019). Por su facilidad de extrusión y estabilidad térmica, el PETG y otros derivados del PET son cada vez más usados en manufactura aditiva.

2.6 Pruebas físicas

Se propuso un experimento, donde interactúen tres variables donde, su interacción se mide respecto al tiempo de exposición y la deformación final presentada, las cuales proporcionarán una metodología de estudio de las interrelaciones entre los factores múltiples de interés, para el caso particular de análisis las variables son: Cargas mecánicas a compresión, cargas térmicas y porcentaje de material impreso, se muestra una representación sencilla del experimento en la figura 11.

Figura 11
Diagrama representativo del experimento



Realizadas las primeras pruebas, se optó por modificar el experimento por el riesgo a quemaduras y daño al equipo de medición en la toma de las mediciones. Realizando entonces la exposición a cargas por compresión pasada la exposición térmica y fuera de la mufla (Felisa FE-361 manual), se muestra en la figura 12 la mufla, así como la placa metálica aplicando carga por compresión a la pieza de experimentación.

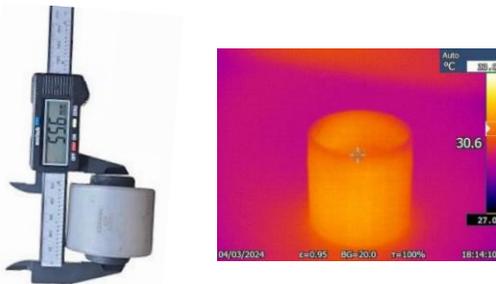
Figura 12
Pruebas físicas de cargas térmicas y esfuerzos por compresión



Las mediciones térmicas fueron realizadas por una cámara termográfica Fluke Ti32 que combina imágenes digitales e infrarrojas, cuyos rangos de medición temperatura oscilan de entre -20 ° y 600 °C

Las mediciones de deformación fueron realizadas con un vernier digital una vez que la pieza regreso a temperatura ambiente, mostrando la forma de medición en la figura 13.

Figura 13
Mediciones de temperaturas y deformaciones sobre piezas de análisis. Imagen y obtención de datos de la cámara termográfica Fluke Ti32 y extraídas del software Fluke SmartView 3.2.1



Se registraron los datos de la experimentación en la tabla 4.

Tabla 4
Resultados de mediciones de alturas de las piezas tras las pruebas (mm) y temperaturas (°C)

	PLA 5MI N	PLA 15MIN	ABS 5MIN	ABS 15MIN	NYLA MID 5MIN	NYLA MID 15MIN
100%	23.9	23.7	24.7	24.7	24.6	24.6
Pieza azul	50	60.3	53.1	61.5	61.8	71.6
Pieza negra	25.2	24.9	25.3	25.3	25.2	25.2
75%	53.2	61.1	57.6	61.7	64.3	73.8
50%	23.9	23.6	24.7	24.7		
Pieza azul	51.3	61.6	58.2	66.2		
Pieza negra	24.8	24.7	25.3	25.3		
25%	54.1	64.6	59.6	66.2		
Pieza azul	23.5	22	24.7	24.6		
Pieza negra	51.6	63.3	52.9	64.4		
Pieza azul	24.4	24.1	25.3	25.2		
Pieza negra	54.3	65.5	53.9	62.4		
Pieza azul	23.5	21.6	24.7	24.6		
Pieza negra	54.3	63.8	62.5	71.8		
Pieza azul	24.4	23.9	25.3	25.2		
Pieza negra	56.3	66.2	52.8	66.8		

2.7 Otras consideraciones

Consideraciones de experimentos realizados por terceros, con pruebas que constan de sumergir parcialmente piezas impresas en 3D en un pequeño volumen de disolvente orgánico. El agente corrosivo Nitro-P, es utilizado para diluir pinturas y es muy agresivo. Seleccionado para maximizar el daño, las partes impresas en 3D, se sumergieron en el disolvente durante un período de 24 horas, y su cambio de forma y propiedades fue monitorizado seguida de una evaluación visual y física mostrado en la figura 14. (Ara, E. 2022).

Figura 14
Consideraciones adicionales de resistencia química, experimento externo.



Los resultados obtenidos de los experimentos realizados por terceros respecto a la resistencia química se muestran en la tabla 5.

Tabla 5
Consideraciones adicionales de resistencia química, experimento externo.

Material	Degradación	Velocidad De Gracional	Variación Mecánica	% De Deformación
PLA	5	4	3	60%
PET-G	2	2	4	10%
ABS	5	3	5	15%
TPU	3	5	1	150%
PA	2	2	4	10%
PP	0	0	0	0%
PACHT CF15	1	1	2	12%
PP GF30	0	0	0	0%

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Esfuerzo de operación

Al utilizar la fórmula 2 podremos obtener el esfuerzo de operación de los siguientes materiales.

$$\sigma = \frac{4.7(9.81)}{\pi(0.0325^2 - 0.208^2)} = 0.023MPa$$

3.2 Factor de seguridad

Utilizando la fórmula 3 se logró obtener el factor de seguridad de diferentes materiales, siendo los resultados adimensionales.



PLA

$$F.S = \frac{55}{0.023} = 2391$$

ABS

$$F.S = \frac{43}{0.023} = 1869$$

PETG

$$F.S = \frac{49}{0.023} = 2130$$

NYLAMID

$$F.S = \frac{70}{0.023} = 3043$$

3.3 Deformación unitaria

Utilizando la fórmula 4 se puede despejar para obtener la deformación unitaria por cada material en función de su módulo de elasticidad, siendo de igual forma los resultados adimensionales.

PLA

$$\varepsilon = \frac{23,000}{3.4E9} = 6.76x10^{-6}$$

ABS

$$\varepsilon = \frac{23,000}{2E9} = 11.5x10^{-6}$$

PETG

$$\varepsilon = \frac{23,000}{1.2E9} = 15.33x10^{-6}$$

NYLAMID

$$\varepsilon = \frac{23,000}{2.75E9} = 8.36x10^{-6}$$

3.4 Deformación final

Aplicando la fórmula 7 de deformación, se obtiene el valor de la deformación lineal, necesario para posteriormente obtener la longitud final línea a través de la fórmula 5.

PLA

$$\delta = L_o\varepsilon + \alpha\Delta TL = (25.3mm)6.76x10^{-6} + (0.068x307.5x0.0253) = 0.00017 + 0.592 = 0.5291mm$$

$$L_f = L_o - \delta = (25.3) - 0.5291 = 24.77mm$$

ABS

$$\delta = L_o\varepsilon + \alpha\Delta TL = (25.3mm)11.5x10^{-6} + (0.088x307.5x0.0253) = 0.00029 + 0.6846 = 0.6849mm$$

$$L_f = L_o - \delta = (25.3) - 0.6849 = 24.61mm$$

PETG

$$\delta = L_o\varepsilon + \alpha\Delta TL = (25.3mm)15.33x10^{-6} + 0.060x307.5x0.0253 = 0.00029 + 0.4667 = 0.467mm$$

$$L_f = L_o - \delta = (25.3) - 0.467 = 24.833mm$$

NYLAMID

$$\delta = L_o\varepsilon + \alpha\Delta TL = (25.3mm)8.36x10^{-6} + 0.1x307.5x0.0253 = 0.00021 + 0.778 = 0.7782mm$$

$$L_f = L_o - \delta = (25.3) - 0.7782 = 24.52mm$$

En la tabla 6 se muestra el resumen de los datos obtenidos por calculo o por experimentación de las deformaciones.

Tabla 6

Resumen de resultados experimentales y calculados de deformación y otras variables

	PLA	ABS	PETG	Nylamid
Esfuerzo de operación (σ) MPA	0.023	0.023	0.023	0.023
Factor de seguridad (adimensional)	2391	1869	2130	3043
Deformación unitaria (adimensional)	6.76E-6	11.5E-6	15.33E-6	8.36E-6
Longitud lineal final calculada (mm)	24.77	24.61	24.93	24.52
Longitud lineal final por experimentación (mm)	23.7	24.7	-	24.6
Variación entre cálculo de deformación final y medición (mm)	-1.07	0.09	-	0.08

IV. CONCLUSIONES

Respecto a los esfuerzos y deformaciones el PLA y el ABS se comportaron de forma similar en cuanto a la ganancia de temperatura. Se estima que una exposición directa a 90°C con 100% de relleno podría requerir hasta una hora para alcanzar dicha temperatura, mientras que con 25% de relleno se lograría en aproximadamente la mitad del tiempo.

Existieron diferencias entre los cálculos y las mediciones realizadas tras las pruebas, esto debido a que el cálculo solo contempla valores medios de esfuerzos, diferencias temperaturas, entre otros y no considera el nivel de relleno del material

En las pruebas, el PLA resultó con una baja resistencia a la compresión, ya que, tras 15 minutos de operación, presentó deformaciones significativas, incluso con altos porcentajes de material. El ABS demostró ser una mejor opción para resistir dichos esfuerzos.

En apoyo con el software de diseño NX se determinó que los tiempos de maquinado varían de 1 minuto 18 segundos a 21 minutos 15 segundos, dependiendo de la pieza y de la estrategia de corte. En comparación, la impresión 3D de las mismas piezas puede tomar de 1 hora 20min hasta 5 horas y 40 minutos, demostrando que el maquinado CNC es más eficiente y rápido, aunque más costoso.

Es importante considerar que el tiempo de fabricación en CNC incluye solo la operación de remoción de material, sin contar el tiempo adicional para preparar la máquina, limpiar, sujetar y extraer la pieza, así como quitar virutas. Tampoco se consideran traslados de materias primas ni re-trabajos, etc.

Este tipo de análisis sin duda pueden contribuir a la toma de decisión respecto a la selección de materiales para un posible uso industrial, como se mostró en los datos de consideraciones adicionales, existen variables de control que han de robustecer la experimentación con pruebas en el mismo material, para asegurar que el comportamiento en la pieza deseada. Es entonces necesario enfocar los análisis según su aplicación.

Se recomienda ampliar la investigación con tiempos más prolongados de exposición para corroborar tendencias, probar más materiales incluyendo resinas y ya sea bajo el proceso de impresión, o por moldeo u otros, además de considerar de forma más amplia la industria de aplicación, ya que difiere en gran medida si se aplicase en la industria de medicina o de alimentos respecto a su aplicación en la minería o construcción.

V. AGRADECIMIENTOS

En primera instancia agradecemos al M.D.G.P.T Jesús Alejandro Valdés Nieblas, subdirector de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, por su apoyo para la realización de este proyecto, así como al Ing. Everardo Rafael como guía en relación a la propuesta de datos de análisis según su experiencia en la industria respecto al uso de piezas plásticas de desgaste, siendo así la base de desarrollo de la idea para su futura implementación en pruebas de campo en el sector industrial.

Extendemos el agradecimiento a los estudiantes Janeth Alejandra Díaz Vallejo y Guillermo Avalos Cruz que a lo largo del desarrollo del proyecto colaboraron con su dedicación y esfuerzo para la culminación exitosa de las pruebas y proyecto en general.

Agradeciendo también al Tecnológico Nacional de México campus Lerdo como casa de adscripción donde se desarrollaron las pruebas de laboratorio para proporcionar resultados de análisis y cuyos mismos fueron la base del trabajo vinculado.

VI. REFERENCIAS

- Aceros Levinson. (2018). PL Aceros Levinson. Aceros Plásticos Metales. <https://www.aceroslevinson.com/plasticos/nylamid/propiedadesprincipales/>
- Algarni, M., & Ghazali, S. (2021). Comparative Study of the Sensitivity of PLA, ABS, PEEK, and PETG's Mechanical Properties to FDM Printing Process Parameters. *Crystals*, 11(8),995. <https://doi.org/10.3390/cryst11080995>
- AMFG, FDM 3D Printing: Comparing ASA, PETG, and PC Filaments AMFG, <https://amfg.ai/2019/02/12/fdm-3d-printing-asa-petg-pc-filaments-compared/> (2019).
- Ara, E. (2022, 3 enero). Probando la resistencia química de materiales de impresión 3D. BCN3D Technologies. <https://www.bcn3d.com/es/test--definitivo-corrosion-materiales-impresion-3d/>
- ASTM International. 203AD. «F2792 - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies.»

- Carrasco Garcia, J. C., (2006). Tecnología avanzada del diseño y manufactura asistidos por computador - CAD/CAM. *Prospectiva*, 4(1), 75-81.
- Groover, M. P. (1997b). *Fundamentos de manufactura mode*. Pearson Educación.
- Lopez, R. (2018). *Impresión 3D y sus aplicaciones en medicina* [Presentación en Congreso, Universidad Nacional de Cuyo]. http://tesisfcp.bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/13174/17-ciencia-tecnologia-e-innovacion-lopez-roberto-unt.pdf
- Rojas Lazo, O., & Rojas Rojas, L. (2006). *Diseño asistido por computador*. *Industrial Data*, 9(1), 7-15.
- Roselló Cruz, D. (2022). Estudio de las aplicaciones de la impresión 3D en el ámbito de la construcción (Tribunal Final de Grau). UPC, Escola Superior d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa, Departament de Resistència de Materials i Estructures a. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2117/364632>
- Serna C. L, Rodríguez de S. A, Albán A. F. (2011) *Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones*. https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/2301
- Strauß, M. (2023). *Das beste Filament für 3D-Drucker: 14 Sorten PETG im Test*. TechStage. <https://www.techstage.de/ratgeber/das-beste-filament-fuer-3d-drucker-14-sorten-petg-im-test/zqm9205>
- Vinicio, M. o. J. (2016). Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semi - rígido impresos en 3D con cinco mallados internos diferentes. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/13064>
- Weller, Christian, Robin Kleer, and Frank T. Piller. (2015). Economic Implications of 3D Printing: Market Structure Models in Light of Additive Manufacturing Revisited. *International Journal of Production Economics* 164. Elsevier: 43–56. doi:10.1016/j.ijpe.2015.02.020.

VII. AUTORES

Arturo Serrano Hernández

<https://orcid.org/0009-0001-1302-5747>

Eduardo Machado Díaz

<https://orcid.org/0000-0003-2610-7570>

Efraín Vaquera González

<https://orcid.org/0009-0002-9123-6977>