

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE MECANICA**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN PROBETAS DE MATERIAL TERMOPLÁSTICO OBTENIDAS POR IMPRESIÓN ADITIVA 3D MDF Y TRATADAS TÉRMICAMENTE.**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN PROBETAS DE MATERIAL TERMOPLÁSTICO ABS OBTENIDAS POR IMPRESIÓN ADITIVA 3D MDF Y TRATADAS TÉRMICAMENTE.**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**WALTER SEBASTIÁN MACÍAS JIMÉNEZ**

**DIRECTOR: CARLOS WIME DÍAZ CAMPOVERDE**

**21, febrero 2024**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, Walter Sebastián Macías Jiménez declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



---

**Walter Sebastián Macías Jiménez**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Walter Sebastián Macías Jiménez, bajo mi supervisión.

---

**CARLOS WIME DÍAZ CAMPOVERDE**  
**DIRECTOR**

Certificamos que revisamos el presente trabajo de integración curricular.

---

**REVISOR1 DEL TRABAJO DE**  
**INTEGRACIÓN CURRICULAR**

---

**REVISOR2 DEL TRABAJO DE**  
**INTEGRACIÓN CURRICULAR**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

WALTER SEBASTIÁN MACÍAS JIMÉNEZ

CARLOS WIME DÍAZ CAMPOVERDE

## **DEDICATORIA**

Todo el tiempo, trabajo, dedicación, y cariño invertido en este estudio es dirigido a quienes prestaron su apoyo para su desarrollo y quienes me lo brindaron a mí para culminar este trabajo. Este estudio es dedicado a mi familia, amigos, mentores y hacia todo aquel que pueda aprender de este.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a las personas que formaron parte de mi proyecto de vida profesional a mi madre Sandra, a mis hermanos Mateo y Carolina, a mis abuelos y especialmente a Cesar; Silvana y Poleth y a la familia en general; quienes fueron el pilar y ejemplo a seguir. Además, especial reconocimiento merecen Franklin, Marcos, Gaby, Fernando, Ángelo, Francisco, Emilio, Camila, Marks, Daya, Mateo, Leo y Jaime quienes me brindaron su amistad y con quienes he compartido experiencias que han permitido cumplir una meta, como también a los docentes. Ing Santiago Camacho, Ing. Manuel Narváez por haber compartido sus conocimientos en el aula y mi estima al Ing. Carlos Diaz por su acertada dirección de tesis.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES .....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN .....	VII
ABSTRACT.....	VIII
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO .....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos .....	2
1.3 Alcance .....	2
1.4 Marco teórico .....	2
Tipos de polímeros .....	4
Elastómeros.....	4
Termoestable .....	4
Termoplásticos .....	5
Propiedades de los termoplásticos.....	5
Formas de procesamiento de los polímeros.....	8
Aplicaciones .....	9
Polímero Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS).....	10
Impresión 3D o manufactura aditiva (MA) .....	11
Tipos de fabricación de manufactura aditiva .....	11
Parámetros del proceso de impresión 3D .....	12
Impresión MDF (Modelado por deposición fundida) .....	13
Aplicaciones .....	15
Tipos de impresoras que existen y sus diferencias.....	16
Materiales utilizados para la impresión aditiva .....	16
Tratamientos térmicos .....	17
Tipos de tratamientos y sus aplicaciones .....	17
2 METODOLOGÍA.....	19
2.1 Materiales .....	19
Filamento ABS .....	19
2.2 Procedimiento .....	21

Diseño .....	21
Impresión .....	23
Tratamiento térmico .....	28
Macrografía .....	31
Ensayo de tracción .....	32
Ensayo de flexión .....	34
Ensayo de dureza .....	35
<b>3 RESULTADOS .....</b>	<b>36</b>
3.1 Macrografías .....	36
3.2 Ensayos de tracción .....	37
3.3 Ensayos de flexión .....	40
3.4 Ensayos de dureza .....	42
<b>4 ANALISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>43</b>
4.1 Impacto en la Estructura y Propiedades de los Polímeros .....	43
4.2 Propiedades Mecánicas .....	43
4.3 Dureza Superficial y Aplicaciones Potenciales .....	44
4.4 Implicaciones y Futuras Direcciones .....	44
<b>5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>45</b>
5.1 Conclusiones .....	45
5.2 Recomendaciones .....	45
<b>6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>47</b>
<b>7 ANEXOS .....</b>	<b>49</b>
ANEXO I. Informe de los ensayos de flexión, tracción y dureza .....	49
ANEXO II. Informe de las macrografías .....	58

## RESUMEN

Los tratamientos térmicos, comúnmente asociados con metales, también pueden ser aplicados a polímeros. En este extenso grupo de materiales se destaca la categoría de los termoplásticos, cuyas estructuras están compuestas por regiones amorfas o semicristalinas constituidas por cadenas poliméricas. La versatilidad en las formas de conformación es una de las ventajas distintivas de los polímeros. En el presente estudio, se explora el empleo de la tecnología de impresión 3D MDF utilizando filamento ABS. A pesar de que este proceso permite la creación de geometrías complejas y detalladas, se enfrenta a limitaciones en las propiedades mecánicas de las piezas resultantes. Por lo tanto, se propone la implementación de un tratamiento térmico post-procesado a temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) del ABS para modificar su estructura y, consecuentemente, alterar las propiedades mecánicas de las piezas. El tratamiento térmico provoca una reorganización de las cadenas poliméricas hacia una con mayor orden lo cual repercute en las propiedades mecánicas. Por medio de ensayos de dureza, tracción, flexión y la toma de macrografías se determina los cambios provocados por la exposición a tratamiento térmico. Se determina que el grupo sometidos al tratamiento térmico mantiene su aspecto físico. Además, se obtiene un aumento en la deformación a la rotura, dureza y una disminución del módulo de elasticidad respecto al grupo de probetas que no fueron tratadas.

**PALABRAS CLAVE:** Tratamiento térmico, ABS, impresión 3D, propiedades mecánicas, termoplásticos.



## ABSTRACT

Heat treatments, commonly associated with metals, can also be applied to polymers. In this extensive group of materials, the category of thermoplastics, whose structures are composed of amorphous or semi-crystalline regions made up of polymeric chains, stands out. The versatility in the conformational forms is one of the distinctive advantages of polymers. In the present study, the use of MDF 3D printing technology using ABS filament is explored. Although this process allows the creation of complex and detailed geometries, it faces limitations in the mechanical properties of the resulting parts. Therefore, the implementation of a post-processing heat treatment at glass transition temperature ( $T_g$ ) of ABS is proposed to modify its structure and consequently alter the mechanical properties of the parts. The heat treatment causes a reorganization of the polymeric chains towards one with higher order, which has an impact on the mechanical properties. By means of hardness, tensile, flexural and macrographic tests, the changes caused by heat treatment exposure are determined. It is determined that the group subjected to heat treatment maintains its physical appearance. In addition, an increase in the deformation at failure, hardness and a decrease in the elastic modulus was obtained with respect to the group of specimens that were not treated.

**KEYWORDS:** Heat treatment, ABS, 3D printing, Mechanical properties, .

# 1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

En las últimas décadas aumentó el uso de polímeros en gran cantidad de sectores industriales y en ámbitos cotidianos, esto ha provocado una mayor demanda en cuanto a propiedades mecánicas. En función de solventar este dilema se busca definir un tratamiento post-procesado que cambie las propiedades mecánicas de las piezas. Por ello, a pesar de que los tratamientos térmicos (TT) frecuentemente se vinculan a los metales estos también pueden extenderse al grupo de los polímeros, específicamente los termoplásticos, que se clasifican de acuerdo con la disposición de sus cadenas poliméricas; el tratamiento térmico permite modificar o degradar estas cadenas teniendo como efecto el cambio de sus características.

Los elementos poliméricos pueden adoptar una infinidad de disposiciones geométricas que pueden ser simples o complejas. La impresión 3D de tipo adhesiva MDF (Modelado por Deposición Fundida) en materiales poliméricos se ha masificado a causa de su versatilidad, bajo costo y capacidad de obtener geometrías de todo tipo. A pesar de todas esas cualidades se encuentra limitado a las propiedades mecánicas del filamento utilizado para la impresión, es decir, aunque disponga de una gran flexibilidad para obtener geometrías diversas no es capaz de satisfacer ciertas tareas que exigen ciertas propiedades mecánicas. Por ende, con el fin de cambiar las propiedades mecánicas de la pieza y sea capaz de adecuarse a una mayor gama de trabajos se desarrolla esta investigación. Para este estudio se fabricarán probetas de polímero ABS en formato de filamento con parámetros de impresión controlados para que todas las probetas sean iguales en base a las normas ASTM, generando dos grupos; el grupo sin tratamiento térmico (STT) y el grupo sometido al tratamiento térmico (CTT). Este proceso se define de acuerdo con la temperatura de transición vítrea del ABS y también se establece un tiempo específico de exposición. Además, se realiza un análisis de las propiedades mecánicas y aspecto físico entre los grupos establecidos por medio de ensayos de tracción, flexión, dureza y toma de macrografías. En base a la información obtenida de los diferentes ensayos realizados a ambos grupos se determina las diferencias en sus propiedades mecánicas y aspecto.

## **1.1 Objetivo general**

Estudiar el comportamiento mecánico en probetas de material termoplástico ABS obtenidas por impresión aditiva 3D MDF y tratadas térmicamente.

## **1.2 Objetivos específicos**

1. Desarrollar probetas por impresión 3D MDF de polímero ABS.
2. Procesar el acabado superficial para realizar ensayos de dureza.
3. Someter a la mitad de las probetas a un tratamiento térmico y analizar los cambios generados en las propiedades mecánicas y estructura
4. Realizar ensayos de tensión, dureza, flexión y macrografía a todas las probetas.
5. Analizar y comparar los resultados obtenidos de los ensayos aplicados a las probetas.

## **1.3 Alcance**

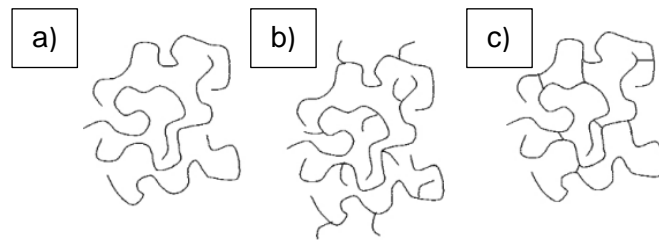
Realizar un tratamiento térmico a probetas de material ABS obtenidas por impresión aditiva MDF. Se analizará el cambio de propiedades mecánicas y aspecto físico en las probetas por medio de ensayos de tracción, flexión, dureza y toma de macrografía a los grupos STT y CTT. El tratamiento térmico se restringe a un tiempo y a una sola temperatura. Las probetas empleadas y los ensayos realizados seguirán las normas ASTM para polímeros.

## **1.4 Marco teórico**

### **Polímeros**

Los polímeros son empleados desde el siglo XIV en Haití, aunque, estos eran de origen natural u orgánicos, los polímeros sintéticos se desarrollaron a partir del siglo XX y en 1920 Herman Staudinger determinó que los polímeros son macromoléculas. Estos son altamente empleados en diversos campos de la industria y es una de las clasificaciones de los materiales en al igual que los metales, cerámicos, materiales compuestos, etc. Los polímeros difieren del resto por diversos parámetros como su composición química, propiedades mecánicas, densidad, propiedades físicas, etc. Algunos usos de los plásticos son: piezas interiores de autos, botellas, envoltorios, estructura para dispositivos electrónico y una gran cantidad de productos más. Es capaz de suplir una gran cantidad de tareas por su capacidad de ser sintetizado [1].

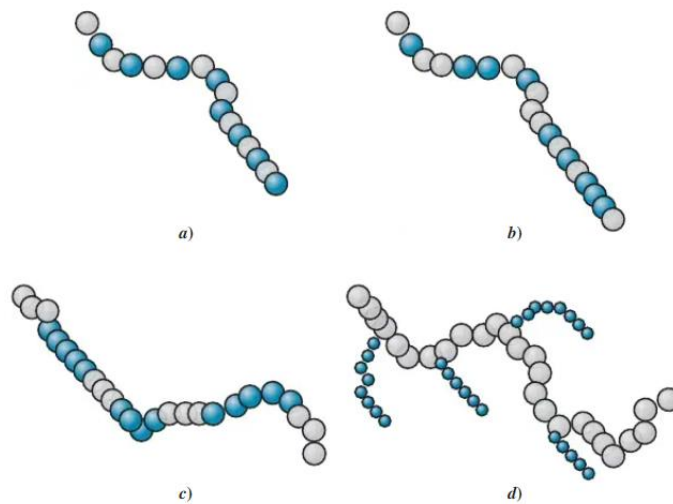
Un polímero se conforma de un conjunto de moléculas pequeñas, también conocidos como monómeros, los cuáles se unen y forman largas cadenas denominadas polímeros. Estas cadenas cuando se polimerizan terminan entrelazadas con otros polímeros conformando copolímeros, ese tipo de materiales presenta una distribución amorfa o semicristalina que puede ser lineal, ramificada y reticulada, estas se muestran en la Figura 1.1. Estos plásticos se pueden dividir en tres grandes grupos: termoestables, elastómeros y termoplásticos, los cuáles se diferencian por sus propiedades brindadas por el tipo de enlaces generados entre estos [1].



**Figura 1.1.** a) Estructura línea. b) Estructura ramificada. c) Estructura reticulada [1].

Las principales formas de polimerización son por adición o condensación. La polimerización por adición necesita polímeros de peso molecular promedio y distribución de peso molecular controlados. Por ende, el sistema debe disponer de un mecanismo capaz de “apagarse” a voluntad. Dentro de este existen dos tipos de unión, la combinación que genera una cadena grande a partir de más pequeñas y el otro es la desproporción que se forma a partir de los extremos activos de una de la cadena capaz de remover un átomo de hidrógeno de la otra [2].

En cuanto al proceso de condensación o polimerización de crecimiento por pasos, este método es progresivo y parte de una molécula relativamente pequeña. El polímero va creciendo de acuerdo con la unión de otros compuestos gracias a que cada monómero es bifuncional, lo cual permite que los extremos sigan reaccionando con otros. Además, las cadenas lineales por adición que se constituyen de 2 o más moléculas se ordenan y forman copolímeros [2]. Los copolímeros se visualizan en la Figura 1.2.



**Figura 1.2.** a) Monómeros alternos. b) Monómeros aleatorios. c) Copolímeros en bloque y d) Copolímeros injertados [2].

### **Tipos de polímeros**

Para clasificar los polímeros es necesario primero identificar ciertas características que diferencian sus estructuras. Todos los polímeros están compuestos por cadenas poliméricas, pero, el cómo interactúen entre estas es lo que cambiará al grupo que pertenezcan. Primero se tiene que el tipo de cadenas pueden ser lineales o ramificadas. Las lineales presentan similitud al espagueti, mientras que, las ramificadas muestran pequeñas cadenas que se separan de las principales. Además, cabe recalcar que el describir como lineales a las cadenas no implica que sean rectas en su totalidad. Otro factor sumamente importante para clasificarlos son los enlaces entre cadenas y las propiedades que presentan [2].

### **Elastómeros**

Se los suele relacionar con el caucho. Pero, los elastómeros son un tipo de polímero con estructura amorfa y su temperatura de trabajo se encuentra por encima de la temperatura vítrea. Una de las características que diferencia a los elastómeros de los demás polímeros es su capacidad de recuperarse de ser sometidas a grandes fuerzas o deformaciones. Otras propiedades es su resistencia a la abrasión, fluidos acuosos, resistencia al deterioro y alto coeficiente de tracción. En cuanto a su estructura pueden ser termoestables o termoplásticos ligeramente entrelazados, sus moléculas se asemejan a resortes [1], [2].

### **Termoestable**

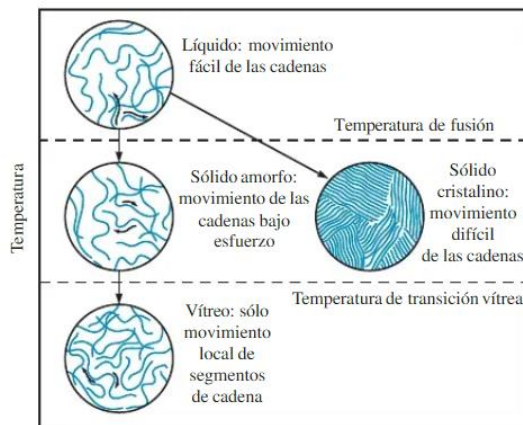
Los polímeros termoestables o termoendurecibles se componen de monómeros y oligómeros que presentan un peso molecular bajo que disponen de grupos funcionales reactivos variados. Su estructura consiste en una red tridimensional, donde las cadenas poliméricas pueden ser ramificadas o lineales. Presentan características como ser duros, pero más frágiles que los termoplásticos, también, al calentarlos estos no se funden, sino que se descomponen, por lo que una vez las reacciones químicas provoquen que se entrelace su estructura es difícil de ser reprocesados. En el área de la industria este representa un 15% de la producción de plásticos que se distribuyen en diferentes productos que suplen una necesidad [1], [2].

### **Termoplásticos**

Se constituyen de la unión de monómeros en largas cadenas, las cuáles pueden ser lineales o ramificadas, que se caracterizan por su comportamiento dúctil y plástico. Las cadenas de monómeros se encuentran entrelazadas, estas cadenas se encuentran vinculadas por enlaces de van der Waals, los cuáles son más débiles que los covalentes. Las cadenas que conforman el polímero pueden estar o no relacionadas o entrelazadas, aunque, otras sí lo estarán. Los termoplásticos se pueden presentar con disposiciones cristalinas o amorfas. La principal característica de este grupo de polímero es que al ser expuestos a calor estos se ablandan o funden, lo cual, facilita su procesamiento y reciclaje [2].

### **Propiedades de los termoplásticos**

Los polímeros termoplásticos poseen propiedades que varían en función de la temperatura. Este factor es empleado para mejorar el diseño de componentes por diferentes tipos de procesamiento, como: inyección, impresión 3D, extrusión, etc. Cuando el termoplástico se encuentra por debajo de la temperatura de fusión estos presentan morfología cristalina o amorfa, aunque, también suelen presentar ambos a la vez. La cristalinidad puede obtenerse por medio de un enfriamiento controlado a una exposición de esfuerzos. Como se aprecia en la Figura 1.3.



**Figura 1.3.** Efecto de la temperatura en la estructura y el comportamiento de los materiales termoplásticos [2].

Dado que, la unión entre cadenas es de van der Waals, se pueden romper por medio de esfuerzos, y la facilidad con la que estas cadenas se separen dependen de la temperatura y estructura del polímero. Aunque, si esta temperatura es muy alta, llegando o superando la temperatura de degradación, afectará los enlaces covalentes que entrelazan las cadenas poliméricas lo que provocaría que se carbonicen o quemen. Esta degradación sucede en estado líquido, el deterioro también puede presentarse en estado sólido, pero, es lenta y a casusa de condiciones externas.

El punto de fusión es una de las propiedades físicas más importantes al momento de elegir un polímero y su procesamiento. Un polímero que se encuentra sobre su punto de fusión cambiará de estado progresivamente de sólido a líquido. Sin embargo, no se puede hablar de un valor en concreto en cuanto respecta al punto de fusión, más bien, a un rango de valores. Mientras que, si están por debajo del punto de fusión las cadenas tienen una disposición amorfa y al acercarse al punto de fusión tiene un comportamiento de caucho, en este estado si se aplica un esfuerzo se deformará permanentemente, pero no acumulará esfuerzos de la deformación.

Por otro lado, la temperatura de transición vítrea también corresponde a un rango de valores de temperatura, como se aprecia en la Figura 1.4, para un polímero que se encuentra por debajo de esta es un polímero amorfo lineal frágil y duro semejante al vidrio. Al entrar a esta región el polímero presenta una mala ductilidad, pero, buena tenacidad rigidez y resistencia a la termofluencia.

Polímero	Intervalo de temperatura de fusión	Intervalo de temperatura de transición vítrea ( $T_g$ )	Intervalo de temperatura de procesamiento
<b>Polímeros por adición</b>			
Poliétileno de baja densidad (LD)	98–115	–90 a –25	149–232
Poliétileno de alta densidad (HD)	130–137	–110	177–260
Cloruro de polivinilo	175–212	87	
Polipropileno	160–180	–25 a –20	190–288
Poliestireno	240	85–125	
Poliacrilonitrilo	320	107	
Politetrafluoroetileno (teflón)	327		
Policlorotrifluoroetileno	220		
Polimetilmetacrilato (acrílico)		90–105	
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)	110–125	100	177–260

**Figura 1.4.** Rango de temperaturas para algunos polímeros [2].

En cuanto a las propiedades mecánicas disponen de un comportamiento coelástico y no newtoniano. Por ende, la deformación elástica presenta efectos diferentes a cuerpos rígidos, es posible deformarlo por medio de dos mecanismos, la aplicación de un esfuerzo en los enlaces covalentes de las cadenas y estas se estiren y distorsionen. El esfuerzo debe ser superior a la resistencia de fluencia para deformar plásticamente al termoplástico. La deformación es provocada por el estiramiento, giro, deslizamiento y desenmarañamiento de las cadenas. El esfuerzo generará un cuello de botella que permite el movimiento de las cadenas, pero, llega un estado donde las cadenas se encuentran en paralelo una a la otra generando resistencia y requiriendo un mayor esfuerzo para continuar con la deformación y fractura [2].

Su comportamiento respecto al impacto se define como viscoelástico. A altas tasas de deformación, como las que se presentan durante una prueba de impacto, no se dispone de tiempo adecuado para que las cadenas moleculares se deslicen y provoquen una deformación permanente. En estas situaciones, los termoplásticos exhiben una fragilidad y presentan valores bajos de resistencia al impacto. Algunos de los termoplásticos más empleados y sus propiedades se reflejan en la Figura 1.5.



	Resistencia a la tensión (MPa)	% alargamiento	Módulo elástico (MPa)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Impacto Izod (J/cm)
Poliétileno (PE):					
Baja densidad	21	800	276	0.92	4.9
Alta densidad	38	130	1241	0.96	2.2
Peso molecular ultraalto	48	350	690	0.934	16.2
Cloruro de polivinilo (PVC)	62	100	4140	1.40	
Polipropileno (PP)	41	700	1517	0.90	0.5
Poliestireno (PS)	55	60	3103	1.06	0.2
Poliacrilonitrilo (PAN)	62	4	4000	1.15	2.6
Polimetilmetacrilato (PMMA) (acrílico, plexiglás)	83	5	3100	1.22	0.3
Policlorotrifluoroetileno	41	250	2070	2.15	1.4
Politetrafluoroetileno (PTFE, teflón)	48	400	550	2.17	1.6
Polioximetileno (POM) (acetal)	83	75	3590	1.42	1.2
Poliamida (PA) (nylon)	83	300	3450	1.14	1.1
Poliéster (PET)	72	300	4140	1.36	0.3
Policarbonato (PC)	76	130	2760	1.20	8.6
Poliimida (PI)	117	10	2070	1.39	0.8
Polietereterketona (PEEK)	70	150	3790	1.31	0.9
Sulfuro de polifenileno (PPS)	66	2	3310	1.30	0.3
Sulfona de poliéter (PES)	84	80	2410	1.37	0.9
Poliamidaimida (PAI)	186	15	5030	1.39	2.2

Figura 1.5. Propiedades mecánicas para algunos polímeros [2].

### Formas de procesamiento de los polímeros

Los polímeros se prestan para ser procesados por diversos métodos como el moldeo, la extrusión la manufactura de fibras o películas. El tipo de procesamiento depende de la naturaleza del polímero. Para los elastómeros y termoplástico se emplea casi todos los procesos existentes, dado que, ambos permiten calentarlos y cambiar de estado para darle la forma deseada. Mientras que, los termoestables suelen ser procesados por medio de técnicas de conformado. Algunos de los procesos más populares:

- Extrusión: Este proceso se basa en el uso de un mecanismo de tornillo conformado por un par de tornillos, que desplaza al termoplástico caliente, ya sea en estado sólido o líquido, junto con los aditivos, a pasar a través de la abertura de un dado de extrusión con el objetivo de producir formas sólidas, películas, láminas, tubos o conductos [2].

- Moldeo por soplado: Se introduce una preforma hueca de termoplástico, llamada "parisón", en un molde utilizando presión de gas, y luego se expande para que se ajuste a las paredes del molde. Este método se emplea en la fabricación de botellas, contenedores, tanques de combustible para automóviles y otras estructuras huecas de plástico [2].
- Moldeo por inyección: Los polímeros termoplásticos, cuando se calientan por encima de su punto de fusión y luego se someten a presión utilizando una máquina de extrusión, se ven obligados a entrar en una matriz cerrada para fabricar una pieza. Un émbolo o un mecanismo especial de tornillo ejerce presión para dirigir el polímero caliente hacia la matriz [2].
- Hilado: Permite la producción de filamentos, fibras e hilos a partir de polímeros termoplásticos. Consiste en hacer pasar el polímero a través de un dado que contiene numerosas pequeñas perforaciones. Este dado, conocido como hilador, tiene la capacidad de girar y generar un hilo trenzado [2].
- Colado: Numerosos polímeros pueden ser vertidos en moldes para luego permitir su solidificación. Estos moldes pueden ser láminas de vidrio utilizadas para crear láminas de plástico individuales, o bandas de acero inoxidable que se mueven de manera continua para producir láminas más delgadas mediante un proceso de colado continuo [2].

## **Aplicaciones**

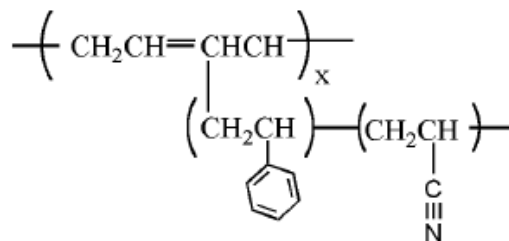
Los polímeros por su facilidad de procesamiento y gran variedad de procesos con los que se puede alterar tanto su forma como propiedades son muy empleados en diferentes áreas, desde lo industrial hasta lo cotidiano, algunas de las aplicaciones para los polímeros más empleados son:

- Polietileno (PE): En el ámbito doméstico se encuentra en juguetes, revestimientos, botellas tuberías, etc. [3].
- Polimetilmetacrilato (PMMA): Se emplea principalmente en construcción civil, mobiliario, industria de vehículos, dispositivos de laboratorio, electrométricos, entre otros [3].
- Policarbonato (PC): Por su dureza y translucidez se emplea en lentes, faros de autos, ventanas, cascos, esferas para postes de luz, etc. [3].

- Polipropileno (PP): Presente en una gran gama de diferentes objetos como: artículos sanitarios, juguetes, componentes de autos, artículos deportivos, electrodomésticos, embalajes alimenticios, entre muchos otros [3].
- Poliestireno (PS): Altamente usado en el embalaje, aunque, también se usa en construcción civil, juguetes, etc. [3].
- Poliuretanos (PU): Tiene presencia en el área de muebles, con este se elaboran cojines, colchones, revestimientos de tejidos, etc. [3].
- Policloruro de vinilo (PVC): Es un termoplástico que presenta gran resistencia al deterioro. Su principal uso es en la industria de la construcción como en ventanas, puertas, muebles, tubos, entre muchos otros [3].

### Polímero Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

Es un copolímero que se conforma de los monómeros acrilonitrilo, butadieno y estireno (ABS) cuya unión afecta las propiedades del material obteniendo excelentes propiedades de rigidez, resistencia y tenacidad. Los procesos más habituales para fabricar ABS incluyen la polimerización mediante injerto de estireno y acrilonitrilo en un látex de polibutadieno, la mezcla con un látex de estireno-acrilonitrilo y, posteriormente, la coagulación y el secado de la mezcla resultante. Como alternativa, se puede fabricar el polímero de injerto de estireno, acrilonitrilo y polibutadieno por separado del látex de estireno-acrilonitrilo, y luego los dos injertos se mezclan y granulan después de su secado. Además, es clasificado dentro de los termoplásticos, específicamente en el grupo de los amorfos, por ello puede ser procesado como cualquier otro perteneciente a este grupo de polímeros [1]. Además, su estructura química se presenta en la Figura 1.6.



**Figura 1.6.** Estructura del Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) [1].

Al igual que cualquier otro copolímero las propiedades de este varían de acuerdo con las proporciones de cada uno de los monómeros que lo conforman. La inclusión de acrilonitrilo en el compuesto proporciona capacidad para soportar altas temperaturas, durabilidad ante sustancias químicas y solidez. Por otro lado, la presencia de butadieno en forma

elastomérica agrega una mayor capacidad para resistir impactos, incrementa la tenacidad, conserva las propiedades a bajas temperaturas y brinda flexibilidad. Por último, la incorporación de estireno contribuye con rigidez, un acabado superficial brillante y facilita el proceso de fabricación. Además, soporta ser maquinado lo cual lo vuelve viable para su aplicación en diversos campos [1].

El ABS presenta una baja resistencia al fuego, opacidad y su baja resistencia al deterioro. Su uso más frecuente es para carcasas de equipos. En cuanto a propiedades físicas de interés se encuentran el punto de fusión que está en el rango de 110-125 [°C] y la temperatura de transición vítrea (Tg) en los 100 [°C] [1].

### **Impresión 3D o manufactura aditiva (MA)**

La manufactura aditiva (MA), también denominada impresión 3D, ha surgido como una plataforma tecnológica versátil para la creación rápida y el diseño asistido por computadora (CAD). Este tipo de fabricación surgió en el año 1980 con el fin de satisfacer la necesidad de desarrollar modelos y prototipos en plazos más cortos de tiempo. La MA permite realizar componentes personalizados en diferentes tipos de materiales como metal, cerámica y polímeros, sin recurrir a moldes o llevar a cabo procesos de mecanizado, a diferencia de los métodos de fabricación tradicionales tanto formativos como sustractivos. Este método presenta mayor versatilidad que los convencionales, puesto que estos se rigen a las limitaciones de procesamiento vinculadas a la producción en masa. Pero, la impresión muestra gran agilidad en diseñar y fabricar elementos personalizados. A pesar de ser capaz de generar geometrías simples o complejas aún tiene varias limitaciones que principalmente es su uso en grandes volúmenes y los materiales en los que se puede utilizar [4].

### **Tipos de fabricación de manufactura aditiva**

Los tipos de fabricación dependen del estado del material base empelado. Es decir, en base líquida, polvo y sólida.

Para base líquida, el cuerpo se forma a partir de la solidificación del material al crearse capa por capa. Estos suelen ser fotopolímeros o resinas, los cuáles se caracterizan por polimerizarse al ser sometidos a luz ultravioleta. Los procesos que se emplean son: Estereolitografía (SLA), Digital Light Processing (DLP), Multi-jet Modeling (MJM), etc.

Por otro lado, para base en polvo, se genera la fusión de capas de polvo por medio de aglutinantes o por fusión. Este tipo presenta gran versatilidad expandiendo su uso fuera de solo los polímeros, se puede utilizar en metales y cerámicos. Algunos de los procesos

existentes: Electron Beam Melting (EBM), Selective Laser Sintering (SLS), Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Binder jetting (BI) y Laser Metal Deposition (LMD).

Por último, los de base sólida, que es el área en la que se enfoca el proyecto, se puede encontrar métodos como: Laminated Object manufacturing (LOM), Fused Deposition Modeling (FDM), entre muchos otros [5].

### **Parámetros del proceso de impresión 3D**

La impresión 3D requiere establecer parámetros con los cuáles se elaborará o desarrollará la geometría deseada y lo que define el G-Code (Código de control automático de la impresora). De estos parámetros dependen sus propiedades mecánicas, acabado superficial, peso, disposición en la que se imprimirá, entre otros. Los parámetros principales son:

- **Altura de capa:** Se encuentra condicionada por el diámetro del extrusor. Mientras menor es la altura de capa mejor resolución o acabado superficial presentará la pieza, aunque el tiempo de impresión aumentará [6].
- **Diámetro del extrusor:** Es el diámetro de la boquilla que se emplea cuyos valores van desde los 0,2 a 1,2 [mm], por donde sale el material. El material de las boquillas varía y sus propiedades por ende también; algunos de estos son: latón, acero endurecido y acero inoxidable o de rubí. Este se elige de acuerdo con el material con el cuál se trabajará [6].
- **Patrón de relleno:** Es el dibujo en el que se deposita el material para rellenar la parte interna de la pieza. Estos pueden variar de acuerdo con el software empleado, pero, los más comunes son: el panal, triangular, diagonal, rectangular, curvo y zigzag. Estos patrones se exponen en la Figura 1.7. Según la distribución elegida las propiedades variarán en cada dirección [6].



**Figura 1.7.** Patrones de relleno [7].

- Densidad de relleno: Se relaciona con la porosidad que presenta la estructura de la pieza, al menos su parte interna. Entre mayor sea la densidad de relleno menor será su porosidad, pero, a su vez este será más pesada y resistente, también consumirá más material y tiempo. Los valores de relleno van del 0% (pieza vacía) hasta el 100% (pieza maciza) [6]. Diferentes porcentajes de relleno se presenta en la Figura 1.8.



**Figura 1.8.** Densidad de relleno, 12%, 30% y 50% [8].

- Velocidad de impresión: Es el movimiento generado en un tramo de tiempo, este se clasifica en 4 principalmente: la velocidad de la zona interna, externa soportes y desplazamientos rápidos donde no se extruye material [6].
- Temperatura de impresión: Es la temperatura que presenta el extrusor y se calibra de acuerdo con el material de trabajo, a su temperatura de fusión [6].
- Temperatura de la cama: Es la temperatura de la plataforma cama para mejorar la adhesión del material depositado [6].
- Orientación de impresión: Es la disposición en la que se depositará el material y formará el volumen del cuerpo. La orientación tiene impacto en factores como la resistencia, el acabado superficial y la disposición de propiedades si es anisotrópico [6].

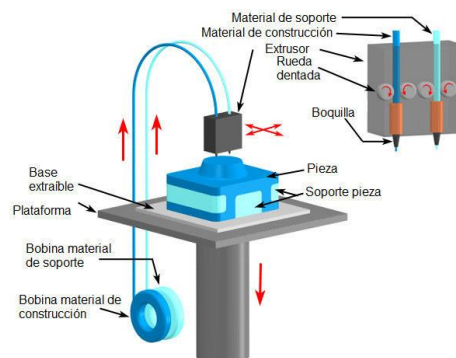
### **Impresión MDF (Modelado por deposición fundida)**

La extrusión de material es un proceso que forma parte de la impresión 3D en el que se funde un material, usualmente un termoplástico, y se empuja a través de una boquilla. El material se deposita en capas sucesivas, formando un objeto tridimensional. Es decir, por medio de curado térmico el material se acopla y endurece. La extrusión de material es uno de los procesos de impresión 3D más comunes, y se utiliza para crear una amplia gama de objetos, desde piezas de repuesto hasta prototipos.

El proceso de extrusión de material es parte importante del modelado por deposición fundida (MDF), que es una tecnología muy empleada cuyo material se suministra en forma

de hilo, este consiste en pasar a través de un extrusor con una boquilla de diámetro pequeño que es calentado por un fusor hasta alcanzar una temperatura dentro del rango de fusión para ser depositada en una plataforma generando el objeto capa por capa.

La parte de la impresora encargada de transportar el filamento hacia la boquilla desempeña un papel crucial en el proceso. En primer lugar, un motor suministra la fuerza necesaria para hacer girar una rueda dentada que generalmente cuenta con 36 o 40 dientes. Esta rueda dentada se encarga de mover el filamento junto con un rodamiento de presión. El filamento se introduce en una unidad llamada "fusor", cuya función principal es calentarlo hasta que alcance su punto de fusión y pase a estado líquido. La temperatura necesaria para este proceso se establece en el código de la impresora. Una vez que el filamento está en estado líquido, puede fluir a través de la boquilla y tomar forma. Para evitar que el calor afecte a otras partes de la impresora, se utiliza un componente llamado "heatbreak", que actúa como aislante y un ventilador para el enfriamiento. Además, el sistema está equipado con termocuplas o sensores para controlar y mantener la temperatura de trabajo dentro de los parámetros requeridos. Por último, las boquillas suelen tener diámetros que oscilan entre 0.2 y 1.2 mm y se fabrican en una variedad de materiales. La elección del diámetro y el material de la boquilla se realiza en función del acabado deseado y del tipo de material que se va a utilizar en la impresión [4]. Un esquema sobre el sistema de extrusión se muestra en la Figura 1.9.



**Figura 1.9.** Esquema del sistema empelado en el proceso MDF [4].

En cuanto a los parámetros fundamentales se establecen mediante software especializado. En los procesos de AM, tras realizar una pieza en un software CAD, se exporta el documento en formato STL. Luego, se establecen los parámetros de impresión en un software compatible con la impresora. Las impresoras pueden ser elaboradas artesanalmente, pero, también hay marcas comerciales como lo es *Creality* que distribuye la línea Ender y es compatible con el software CURA. Para la impresión se debe configurar en función a las propiedades y geometrías que se desean.

## Aplicaciones

Inicialmente, la impresión 3D era utilizada por profesionales familiarizados con este procesamiento, pero su adopción en otros campos se encontraba limitada debido a los costos elevados. Sin embargo, actualmente, los precios de estas impresoras han disminuido y su accesibilidad ha impulsado el crecimiento del mercado. Las áreas en las que esta tecnología se ha aprovechado incluyen [4]:

- Educación: Se utiliza para acercar a los estudiantes al diseño, prototipado y manufactura, así como para el desarrollo de proyectos y estudios.
- Arqueología: La combinación de software y la inteligencia artificial permite obtener réplicas precisas de objetos reales, facilitando la investigación y evitando la manipulación de reliquias arqueológicas valiosas.
- Arte: Los artistas han adoptado esta tecnología debido a su capacidad para crear geometrías complejas y expresar sus ideas y creaciones de manera innovadora.
- Biotecnología: Se utiliza tanto en la investigación como en aplicaciones comerciales para desarrollar tejidos, órganos y otras partes del cuerpo utilizando células vivas depositadas en un medio de gel para crear estructuras tridimensionales funcionales.
- Industria Aeroespacial: Cada vez es más frecuentes en la fabricación de piezas ligeras y resistentes.
- Industria Automotriz: Se emplea principalmente en el desarrollo de prototipos de piezas y para probar su funcionamiento sin la necesidad de crear moldes personalizados costosos.
- Arquitectura: Permite el desarrollo de maquetas completas de edificaciones e incluso elaborar casas de tamaño real.
- Alimentos: Se emplea para elaborar alimentos con un aspecto llamativos para el consumidor.
- Electrónica: Se usa para realiza carcasas de dispositivos electrónicos
- Joyería: Permite realizar joyas con estructuras complejas más exóticas y valiosas.
- Origami: Se utiliza en estructuras ingenieriles debido a las facilidades que ofrece, como diseños complejos, y la manufactura aditiva FDM se ha convertido en una herramienta para fortalecer esta vía de diseño emergente.



## **Tipos de impresoras que existen y sus diferencias**

Existen 4 principales tipos de impresora MDF las cuáles presentan ciertas características que pueden favorecer un proceso o una producción en concreto. Estos tipos son:

- **Cartesianas:** Son las más frecuentes y de las pioneras. Las cuales han disminuido en gran cantidad su precio. Su funcionamiento se basa en el movimiento del cabezal por las coordenadas X-Y y Z para ir depositando el filamento y formando la geometría. Aunque, este movimiento se separa en el plano X-Y para el cabezal y Z para la cama. Hay una gran variedad de modelos y marcas [9].
- **Delta:** Son un mercado emergente que tiene mayor presencia año tras año. Su sistema incluye una cama de impresión circular con una extrusora que se caracteriza por mantenerse a partir de 3 puntos triangulares fijos. Todos los puntos tienen la libertad de subir o bajar para colocar el cabezal donde debe estar [9].
- **Polar:** Reciben el nombre de polares debido a su empleo de un sistema de coordenadas polares, en el cual la posición de cada punto en la superficie de impresión se define en relación con el punto central ubicado en el medio de dicha superficie. Asimismo, utilizan únicamente dos motores para llevar a cabo la impresión, los cuales se centran exclusivamente en el ángulo y la longitud para calcular las áreas de impresión. En contraste, las impresoras cartesianas y delta suelen necesitar tres motores para alimentar cada uno de sus ejes [9].
- **Scara:** Son las más peculiares, se caracterizan por funcionar a partir de un brazo mecánico. Las impresoras 3D de brazo robótico ofrecen beneficios como mayor flexibilidad durante la impresión. Esto se debe a que no están limitadas a una plataforma de impresión fija, lo que las hace más móviles y adaptables, facilitando la impresión de piezas de geometría compleja. Además, las impresoras 3D Scara se desplazan de manera más similar a las manos humanas y tienen una velocidad de impresión superior en comparación con las impresoras cartesianas [9].

## **Materiales utilizados para la impresión aditiva**

La impresión 3D se caracteriza por funcionar en una gran cantidad de materiales poliméricos, cerámicos, materiales compuestos e incluso metálicos en diferentes presentaciones como polvo, filamento, etc. Aunque, estos diferentes materiales también son afines a ciertos procesos de impresión 3D, a continuación, los procesos con sus materiales poliméricos más populares [10]:

- MDF: ABS, PLA, PETG, Nailon, TPU, PVA, HIPS y materiales compuestos.
- SLA: Resina estándar, Clear Resin, Draft Resine, Resinas Tough, Resinas Rigid, High Temp Resin, Resinas Flexibles, Resinas médicas y odontologías, Resinas para joyería y resina cerámica.
- SLS: Nylon 12, Nylon 11, TPU y compuestos de nailon.

### **Tratamientos térmicos**

Abarca a los procesos que involucran temperatura y tienen la finalidad de mejorar la resistencia, ductilidad, dureza y otras propiedades de los materiales, en otras palabras, los procesos de calentamiento o enfriamiento de un cuerpo sólido en condiciones específicas para alterar sus propiedades. El objetivo de los tratamientos térmicos es por medio del calor generar cambios en la estructura del cuerpo de tal manera que adquiera propiedades deseadas [11], [12]. Los tratamientos térmicos son bastante empleados en los metales, aunque, también pueden ser aplicados en los polímeros; ambos teniendo formas diferentes de reacción al ser expuestos al calor.

En cuanto a los polímeros afecta la integridad de las cadenas poliméricas que componen al material llegando a impactar en las propiedades mecánicas y morfológicas. La resistencia a la degradación de los polímeros de acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) es un factor importante en aplicaciones y se ve influida por la composición, las condiciones de procesamiento y funcionamiento, la intemperie, el envejecimiento térmico y los posibles daños durante el procesado. La estructura microscópica específica de un polímero suele facilitar su oxidación térmica. En el ABS, la absorción de hidrógeno por el oxígeno es termodinámicamente favorable debido a la presencia de átomos de carbono terciarios sustituidos. Además, una cantidad de energía térmica suficiente activa el proceso, desencadenando la oxidación y acelerando el proceso general de degradación [13].

### **Tipos de tratamientos y sus aplicaciones**

- **Normalización:** Proceso empleado para darle al material polimérico una mayor resistencia a las tensiones internas por medio de generar una estructura más uniforme. Se logra por medio de calentar el material a cierta temperatura que afecte a las cadenas poliméricas y luego se enfríe de manera controlada. Se suele emplear en la industria para generar una microestructura calculable. Aunque, tras el proceso el material tiende a disminuir su tamaño cerca de un 4%.

- **Recocido:** Procedimiento de tratamiento térmico utilizado en los no metales en general. Por ello, los plásticos son uno de los principales materiales en los que se aplica con la finalidad de mejorar sus propiedades. Tras ser sometidos al tratamiento el material se vuelve más maleable, dúctil y mejorar su resistencia al desgaste. Otro factor es el de generar una microestructura más predecible el cual ayuda en la caracterización del material.

Los procesos son empelados para diferentes tipos de industrias que requieren realizar de manera económica materiales sintéticos con una buena resistencia alargando su vida útil. Tales como en la industria automotriz, electrónica, juguetera, etc. [14].

## 2 METODOLOGÍA

En este capítulo se brinda una descripción específica y detallada sobre los materiales utilizados y los procedimientos desarrollados a lo largo del proceso de análisis de las propiedades y estructura de las probetas impresas en 3D con filamento ABS blanco. En la sección (2.1) se muestran las especificaciones técnicas proporcionadas por la distribuidora del rollo de filamento. La sección (2.2) explica el método de cómo se diseñó, imprimió, realizó el tratamiento térmico y ensayó las probetas para la obtención de la información de propiedades y verificar el cómo afecta a las piezas. El diagrama que muestra la cadena de procesos para su desarrollo se refleja en la Figura 2.1.

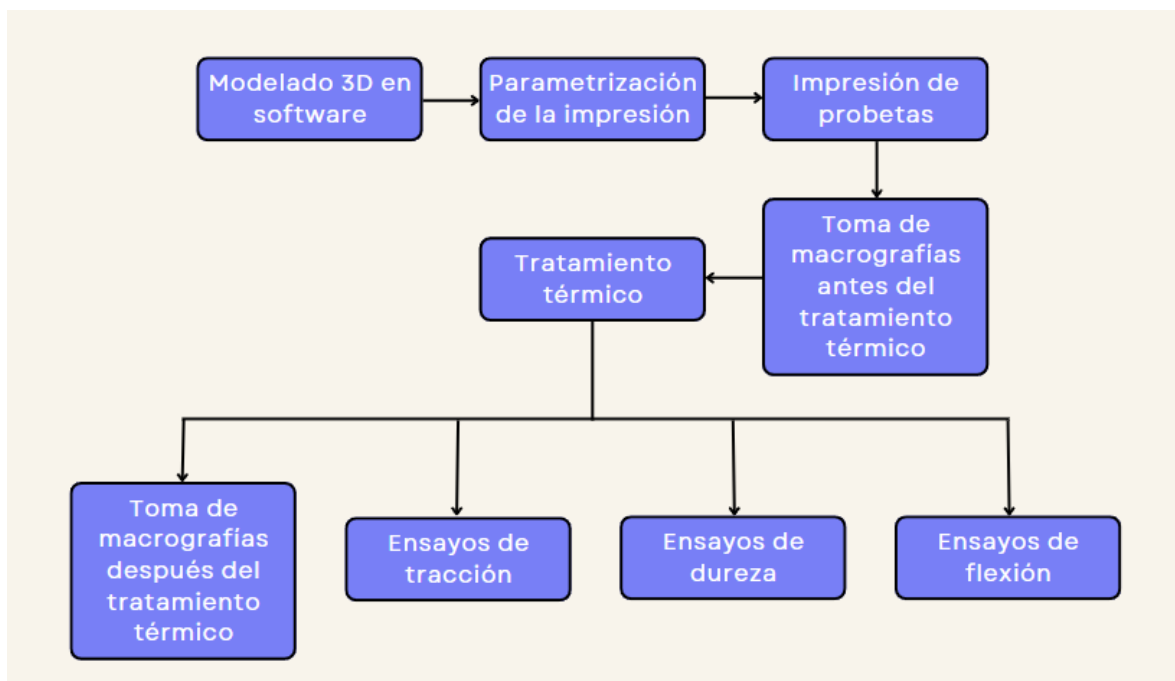


Figura 2.1. Diagrama de flujo de los pasos realizados

### 2.1 Materiales

#### Filamento ABS

El polímero acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) tiene una disposición de cadenas poliméricas amorfas que se forma a partir de la unión de diferentes polímeros que se caracteriza por una buena resistencia al impacto y su dureza. El material se utiliza en forma de filamento que se encuentra en un rollo, el cual pertenece a la marca "SUNLU", como se muestra en la Figura 2.2.



**Figura 2.2.** Rollo del filamento de ABS blanco

Las características físicas y mecánicas del filamento se detallan en la Tabla 2.1 y la composición química del filamento que será utilizado en el presente trabajo se muestra en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.1.** Características del filamento [15].

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Material	ABS
Peso del filamento	1 [kg]
Rango de temperatura de impresión recomendada	250-260 [°C]
Rango de temperatura de la cama recomendada	80-120 [°C]
Rango de velocidad de Impresión recomendada	50-100 [mm/s]
Diámetro del filamento	1,75 [mm]
Resistencia a la tracción	6-11 [kgf]
Densidad	1.04 [g/cm <sup>3</sup> ]
Temperatura de distorsión por calor (0,45 MPa)	78 [°C]
Color	Blanco

**Tabla 2.2.** Composición química del filamento [15].

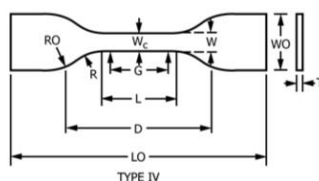
Nombre	CASRN	EC	Contenido (%)
Acrilonitrilo butadieno estireno	9003-56-9	618-371-8 99	99
Estearamida	110-30-5	203-755-6	0,5
Tris(2,4-di-terc-butilfenil) fosfito	31570-04-4	250-709-6	0,5

## 2.2 Procedimiento

### Diseño

Las probetas para cada tipo de ensayo disponen de una geometría y dimensiones especificadas de acuerdo con normas ASTM. Dado que, los ensayos no están definidos para elementos impresos por el método MDF se los caracteriza en función de normativas aplicadas en otros procesos para polímeros. Para el modelado de las probetas, es decir, especificar sus dimensiones y geometría, se emplea el software Autodesk Fusion360.

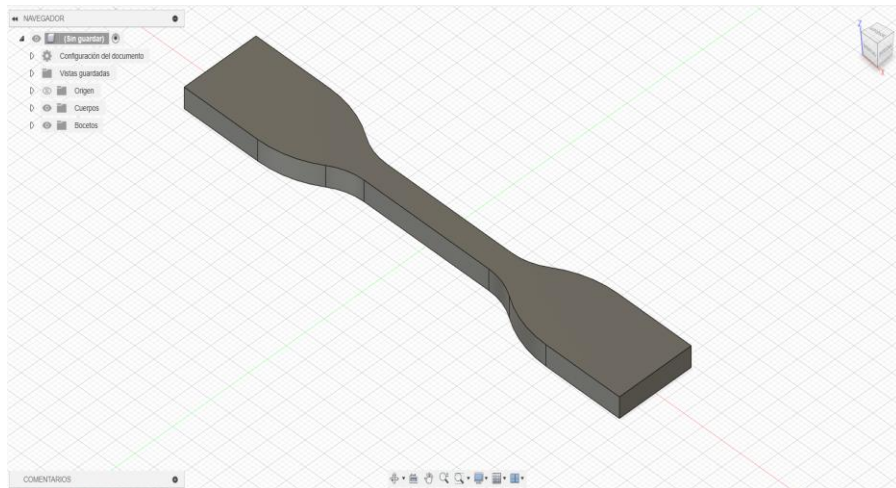
El diseño de la probeta de tracción se realiza de acuerdo con la norma ASTM D638-22, específicamente el tipo IV, cuyas características se verifican en la Figura 2.3. El modelo es generado a partir de un sketch formado por líneas y semicircunferencias que unidas son extruidas para darle el espesor especificado, el resultado se verifica en la Figura 2.4.



Specimen Dimensions for Thickness,  $T$ , mm (in.)<sup>A</sup>

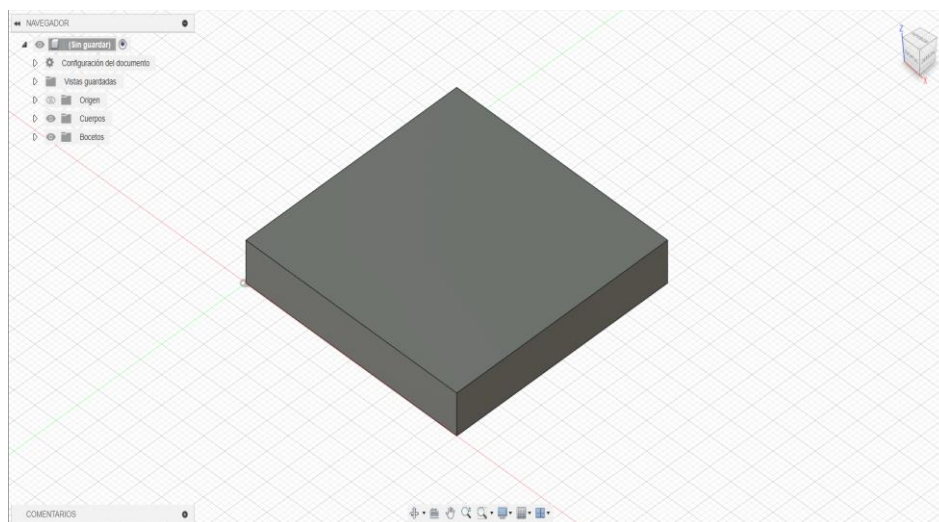
Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl	4 (0.16) or under		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV <sup>B</sup>	Type V <sup>C,D</sup>	
$W$ —Width of narrow section <sup>E,F</sup>	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	$\pm 0.5$ ( $\pm 0.02$ ) <sup>B,C</sup>
$L$ —Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	$\pm 0.5$ ( $\pm 0.02$ ) <sup>C</sup>
$W_O$ —Width overall, min <sup>G</sup>	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)
$W_O$ —Width overall, min <sup>G</sup>	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
$L_O$ —Length overall, min <sup>H</sup>	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
$G$ —Gage length <sup>I</sup>	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	$\pm 0.25$ ( $\pm 0.010$ ) <sup>C</sup>
$G$ —Gage length <sup>I</sup>	...	...	...	25 (1.00)	...	$\pm 0.13$ ( $\pm 0.005$ )
$D$ —Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) <sup>J</sup>	25.4 (1.0)	$\pm 5$ ( $\pm 0.2$ )
$R$ —Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	$\pm 1$ ( $\pm 0.04$ ) <sup>C</sup>
$RO$ —Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	$\pm 1$ ( $\pm 0.04$ )

**Figura 2.3.** Probeta tipo IV para tracción.[16]



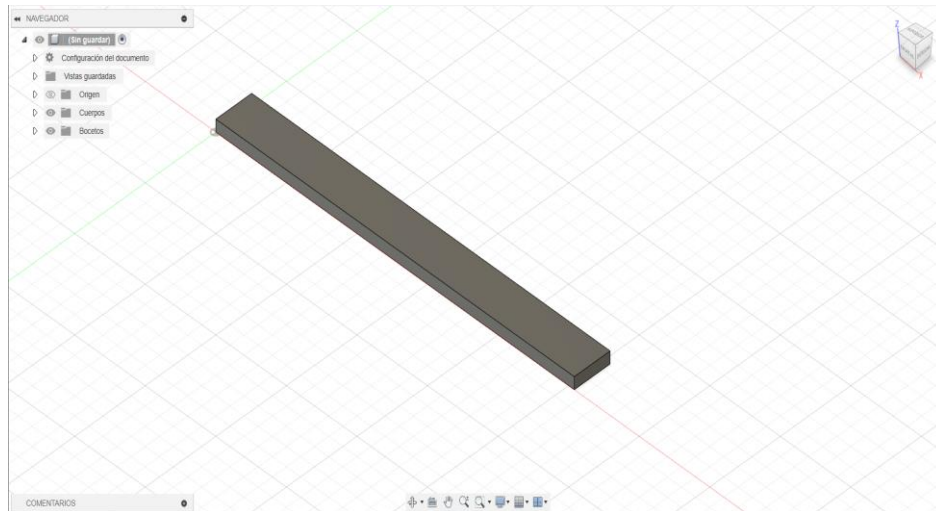
**Figura 2.4.** Modelado de la probeta de tracción en el software Fusion 360.

La probeta que se utilizará para realizar el ensayo de dureza, expuesta en la Figura 2.5, se fabrica considerando las especificaciones dadas por la norma ASTM D2583-13, dónde se menciona que la probeta debe tener un acabado superficial sin rugosidad considerable, libre de defectos, caras paralelas y dimensiones de: 7 [mm] de espesor y 5 [cm] por lado, formando un cuadrado[17]. Se usa un cuadrado para definir la geometría y dimensión de los lados mientras que se vale de la función extrusión para darle el espesor requerido.



**Figura 2.5.** Modelado de la probeta de dureza en el software Fusion 360.

La norma ASTM D790-17 establece las diferentes dimensiones para las probetas a ensayarse a flexión y mostrada en la Figura 2.6, esto basado en el material o espesor. Para una probeta polimérica con un espesor de 3,2 [mm] debe tener un ancho de 12,7 [mm] y un largo de 127 [mm] [18]. La geometría que se obtiene en el sketch es un rectángulo que por medio de la extrusión se le brinda el espesor.



**Figura 2.6.** Modelado de la probeta de flexión en el software Fusion 360.

## **Impresión**

Las impresoras 3D son capaces de formar cuerpos con volumen a partir de diseños realizados por medio de software, pero, requieren de un formato compatible con la impresora. El formato de archivo generado por el software Fusion360 es el predeterminado del programa, el cuál es exportó al formato stl; formato con el cual estos diseños pueden ser introducidos a un software con el cual permite establecer los diferentes parámetros de impresión. El programa que se utilizó para este estudio es el software libre “CURA”.

El software permite la manipulación de más de 100 parámetros de impresión, se centró en aquellas propiedades que pueden tener influencia en gran medida de acuerdo con los trabajos de Bernat [4] e Idrach [6] donde detalla la influencia de los parámetros. Además, se determinó los valores de estos en base a las especificaciones del material detalladas en la Tabla 2.1. Además, se apoyó en las recomendaciones de páginas y foros especializados en impresión 3D [19], [20], [21].

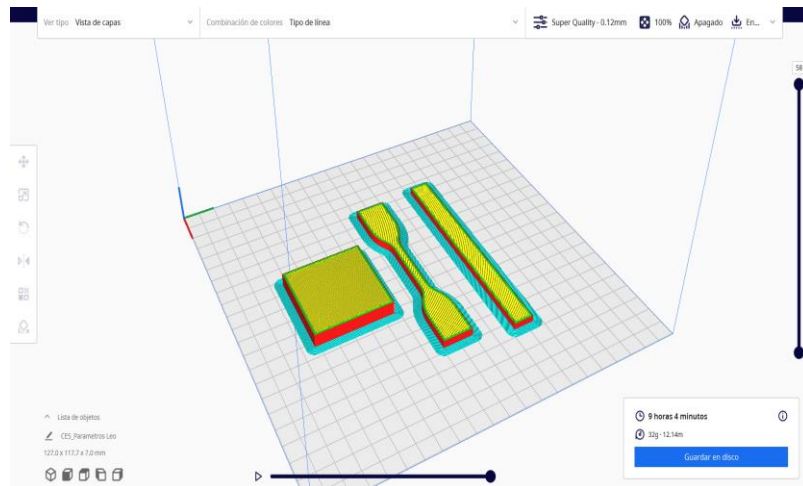
Se definió las propiedades y distribución de impresión para las probetas siendo iguales para los 3 tipos. Los parámetros se exponen en la Tabla 2.3.



**Tabla 2.3.** Parámetros de impresión en el software CURA

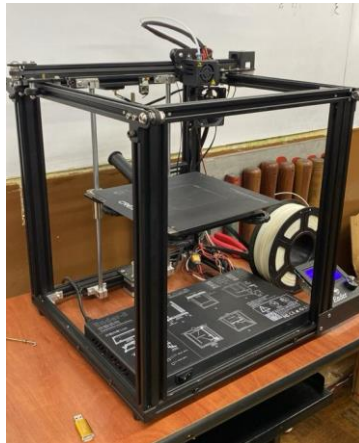
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Altura de capa	0,12 [mm]
Ancho de línea	0,4 [mm]
Ancho de línea de pared	0,4 [mm]
Ancho de línea de relleno	0,4 [mm]
Grosor de pared	1,6 [mm]
Recuento de líneas de pared	4
Grosor superior/inferior	0,84 [mm]
Densidad de relleno	100%
Distancia de línea de relleno	0,4 [mm]
Patrón de relleno	Zigzag
Grosor de capa de relleno	0,12 [mm]
Temperatura de impresión	250 [°C]
Temperatura de la cama	100 [°C]
Velocidad de impresión	40 [mm/s]
Velocidad de pared	20 [mm/s]
Velocidad de desplazamiento	150 [mm/s]
Velocidad de retracción	25 [mm/s]
Retracción en el cambio de capa	Sí
Distancia de retracción	5 [mm]
Refrigeración	No
Soporte	No
Adherencia de la placa de impresión	Borde
Ancho del borde	5 [mm]
Número de líneas de borde	13
Secuencia de impresión	Todos a la vez

Tras ser parametrizadas las especificaciones para la impresión de los 3 tipos de probetas se deben segmentar, con ello se obtuvo un estimado del tiempo de impresión, se muestra la manera en que este se imprimirá y la cantidad de material usado. Como se observa en la Figura 2.7 se divide la impresión en 3 secciones: la zona celeste es el área de la balsa que permite un mejor agarre hacia la cama, la zona roja son las paredes, mientras que, la zona amarilla corresponde al relleno de la pieza.



**Figura 2.7.** Probetas segmentadas en el software CURA

Tras segmentar las probetas se obtuvo el G-Code y se implementó una tarjeta SD para transferir el archivo G-Code de la computadora a la impresora. La impresora implementada para la fabricación de probetas pertenece a la marca Creality cuyo modelo específico es la Ender 5 Pro, impresora expuesta en la Figura 2.8.



**Figura 2.8.** Impresora Ender 5 Pro

La selección de esta impresora se da principalmente por facilidad de acceso. El modelo Ender 5 Pro es una impresora que emplea rollos de filamento que se sostiene por medio de un tubo presente en su estructura con sistema de extrusión para suministrar la materia prima y cuyo tipo de impresión es cartesiana. Las propiedades detalladas del dispositivo se especifican en la Tabla 2.4:

**Tabla 2.4.** Características de la impresora Ender 5 Pro [22].

<b>Características</b>	<b>Valor</b>
Tecnología de modelamiento	MDF
Dimensiones de impresión	220*220*300 [mm]
Dimensiones de la impresora	552*485*510 [mm]
Peso de la impresora	11,8 [kg]
Número de boquillas	1
Espesor de capa	0,1-0,4 [mm]
Formato de documento	STL/OBJ/AMF
Diámetro del filamento	1,75 [mm]
Precisión de impresión	0,1 [mm]
Diámetro de boquilla	0,2;0,3;0,4 [mm]
Voltaje	115V/240V
Software de impresión	CURA/Repetier-Host/Simplify3D

La impresora durante el proceso de impresión estuvo dentro de una caja negra como se ve en la Figura 2.9, esto permitió retener el calor en las piezas impresas reduciendo la velocidad de enfriamiento con lo que se evitó la deformación de las probetas.



**Figura 2.9.** Caja negra para la impresora

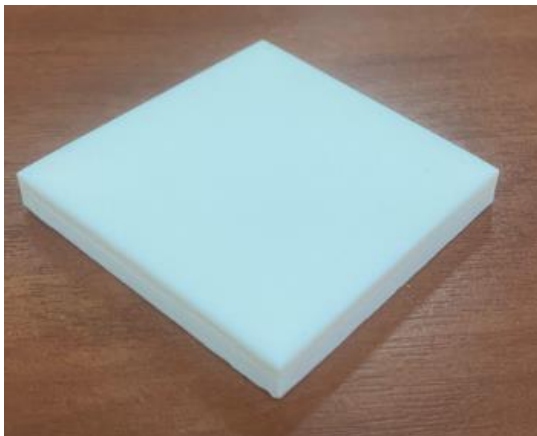
Las probetas son depositadas sobre un protector magnético, que permitió retirar las probetas sin dañar su integridad y también se dispuso de un estilete para retirar el material excedente de la balsa de apoyo. La cantidad de probetas impresas fueron 2 de dureza (Figura 2.12), 10 de flexión (Figura 2.10) y 10 de tracción (Figura 2.11).



**Figura 2.10.** Probeta de flexión



**Figura 2.11.** Probeta de tracción.



**Figura 2.12.** Probeta de dureza

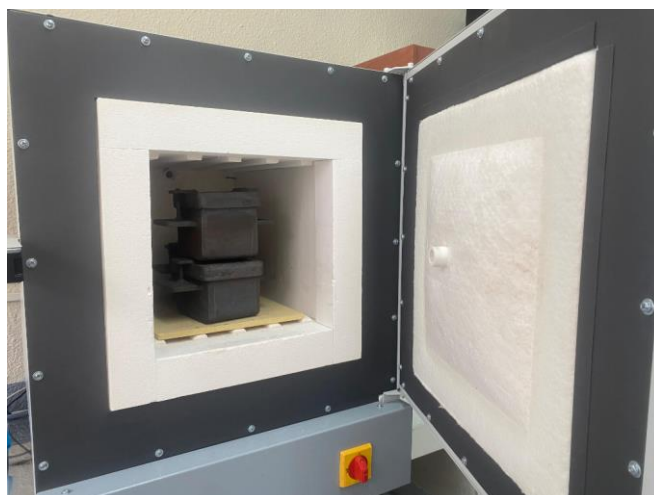
## Tratamiento térmico

Se utilizó los EPPS pertinentes para desarrollar el tratamiento térmico y registrar los datos de interés. Se tomó un grupo de probetas, designado como CTT, para ser sometidas al procedimiento. Para realizarlo se precisa de algunos elementos extras como lo es la arena de fundición (arena de sílice y aglutinante) y cajas de acero. Las cajas de acero tuvieron la función de un recipiente para las probetas y la arena, mientras que, la arena se desempeñó la función de formar camas (2 cm de espesor) donde reposarían las probetas (Figura 2.13). Las camas se depositan una encima de otra al igual que las probetas, este proceso se repitió hasta llenar la caja. El uso de la arena de fundición permitió regular la velocidad de calentamiento y enfriamiento, además evitó que las probetas tengan contacto entre sí. Se seleccionó la arena de fundición y las cajas de acero por factibilidad, puesto que el laboratorio disponía de estos.



**Figura 2.13.** Caja cargada con arena y la probeta

Para el suministro de calor se utiliza una mufla eléctrica, la cual fue precalentada en conjunto de la caja y la arena durante 30 minutos a 100 [°C]. Una vez todos los elementos se encontraban a esta temperatura se ingresó las probetas a las cajas mientras se controlaba que la arena no disminuya su temperatura con un multímetro. Con todas las probetas distribuidas en las cajas se las deja durante un lapso de 5 horas manteniendo los 100 [°C]. Posteriormente, se retiran las cajas de la mufla (Figura 2.14) y se procede a extraer las probetas las cuales se enfrían dentro de la arena (Figura 2.15).



**Figura 2.14.** Cajas ingresando a la mufla eléctrica



**Figura 2.15.** Probetas enfriándose en la arena

La temperatura utilizada para el tratamiento térmico se determinó en base a los trabajos expuestos por Tiagnis ed all [13] y Avila ed all [12] . Tiagnis muestra la manera en que se degrada el polímero ABS a 90 [°C] y 120 [°C], ambas cerca al rango de temperatura vítrea, durante 672 horas. En este lapso explica los cambios físicos como de propiedades mecánicas que sufren las probetas. Se determina que los cambios físicos a cusa de la degradación apenas empieza a tener efecto tras 28 horas de tratamiento térmico. Además, se estima que la temperatura de 90 [°C] apenas muestra cambios, mientras que a 120 [°C] se presencia una degradación acelerada con una disminución en sus propiedades mecánicas. Por otro lado, de acuerdo con el trabajo de Ávila se verifica que la exposición



a temperaturas superiores a la Tg provoca un empeoramiento en las propiedades mecánicas del ABS. Por ello, se optó por emplear la Tg característica del ABS.

De acuerdo con el estudio realizado por Delgado [23] se identifica que el tiempo de exposición tiene gran importancia en las propiedades mecánicas de los polímeros. Se determina que entre mayor sea el tiempo de exposición, mayor será el cambio en el material. Por ende, se establece las 5 horas en base a obtener un mayor cambio en las probetas, pero, a causa de los cortes de energía eléctrica a nivel nacional no fue posible aumentar el lapso de exposición.

Para el tratamiento térmico se emplea una mufla eléctrica marca Snol, modelo 30/1100, el equipo se muestra en la Figura 2.16. Y las dimensiones y características eléctricas del dispositivo se presentan en la Tabla 2.5.



**Figura 2.16.** Mufla Eléctrica

**Tabla 2.5.** Características de la mufla Snol 30/1100 [24].

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Volumen	30 [L]
Temperatura máxima	1100 [°C]
Dimensiones de cámara	300 x 405 x 275 [mm]
Potencia	3,4 [kW]
Voltaje	120 [V]

## Macrografía

Para obtener imágenes sobre la distribución del filamento y geometría de las probetas se realizan macrografías a una probeta, para la toma de las fotos se dispone de un microscopio Olympus SZX7 (Figura 2.17) con el cual se obtendrán 6 macrografías de las cuáles 3 macrografías pertenecen a una probeta sin tratamiento térmico y los otros 3 sobrantes a la misma probeta tras ser sometida al tratamiento térmico. Las macrografías se tomaron a las zonas de interés, estas son: el relleno, las paredes por la parte superior y lateral.



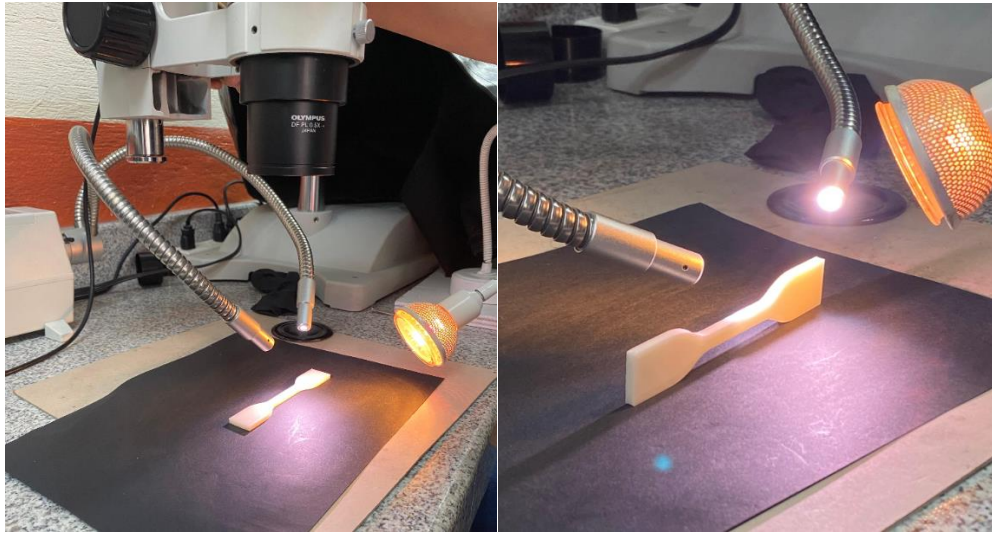
**Figura 2.17.** Microscopio Olympus SZX7

El proceso se realizó por el Laboratorio de Metalografía de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional y se lo ejecutó sobre una probeta de tracción. El resultado no es afectado por el tipo de probeta utilizado, puesto que, todos los tipos de probeta fueron elaborados con los mismos parámetros de impresión.

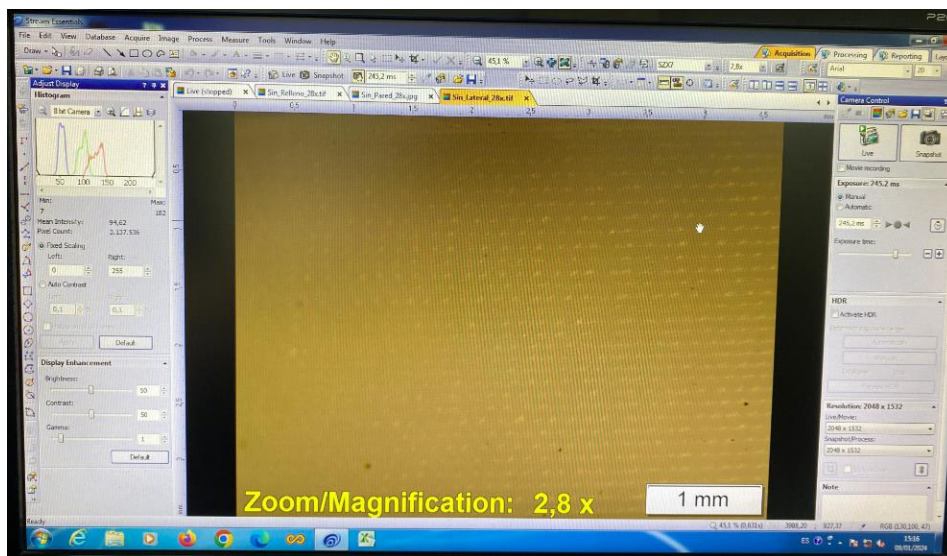
Para tomar macrografías se ubicó la probeta sobre una superficie negra, dado que la probeta es blanca, y se utilizó luz blanca o amarilla para obtener mayor visibilidad de la superficie analizada, como se muestra en la Figura 2.18. Luego, se emplea el microscopio con un aumento de x2.8; aumento con el que se elaboró todas las macrografías. Las imágenes captadas por el microscopio fueron procesadas por el software “Stream Essentials” como se aprecia en la Figura 2.19. Su finalidad es determinar los cambios producidos a nivel superficial como son: presencia de defectos, discontinuidades por el



depósito del filamento producido por impresión 3D e identificar los cambios tras ser sometida al tratamiento térmico.



**Figura 2.18.** Toma de Macrografías a una probeta de tracción.



**Figura 2.19.** Macrografías en el software Stream Essentials.

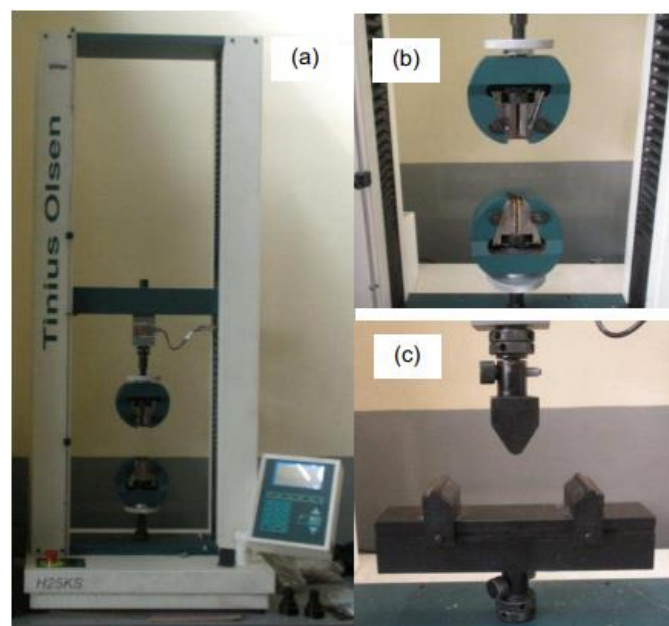
## Ensayo de tracción

La maquinaria usada para este tipo de ensayo es la máquina universal Tinius Olsen y su modelo es el H25KS. La cual trabajará con la probeta de tracción especificada en el punto 2.2.2. Se realizó el ensayo en 5 del grupo CTT y 5 probetas del grupo STT. Con este ensayo se busca determinar para ambos casos, la resistencia última, el porcentaje a la rotura y el porcentaje de deformación última. Para el proceso se empleó una velocidad de 5 [mm/s]

hasta que el material llegue a su falla o se fracture y se calibró la máquina universal con una distancia de 25 [mm].

Para registrar la información se le da una denominación a cada probeta y posteriormente fueron ensayadas. Con esta información es posible desarrollar la gráfica esfuerzo-deformación, en la cual es posible identificar varias características importantes como el esfuerzo último, el esfuerzo de fluencia, etc. También es posible identificar diferentes zonas de acuerdo con la carga generada alterando su comportamiento hasta fallar.

El equipo utilizado es expuesto en la Figura 2.20 (a) y las mordazas en la Figura 2.20 (b), mientras que, sus características se muestran en la Tabla 2.7.



**Figura 2.20.** (a) Máquina Tinius Olsen H25KS. (b) Mordazas cuneiformes. (c) Set de flexión a tres puntos [25].

**Tabla 2.7.** Características de la máquina Tinius Olsen H25KS [26].

Característica	Valor
Carga máxima	25 kN
Tipo	Vertical
Recorrido máximo	1100 [mm]
Precisión de fuerza	< 0,5% de la carga máxima utilizada
Velocidad	0,001 - 1000 [mm/min]
Voltaje	230 [V]
Precisión de velocidad	< 0,005%

Todo el proceso se hizo bajo los estándares de la norma ASTM D638-14. El proceso de desarrolló por el LANUM de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.

### Ensayo de flexión

Se realizó un ensayo de flexión, que consiste en aplicar una carga perpendicular (Figura 2.21) a la superficie de una probeta para deformarla. En este caso, la deformación máxima aplicada fue del 5%.

El ensayo se llevó a cabo en la máquina Tinius Olsen H25KS (Figura 2.20 (a)) utilizando el set de 3 puntos (Figura 2.20 (c)) y el procedimiento se realizó siguiendo la norma ASTM D790-17, que establece la forma de determinar la velocidad de ensayo. Esta velocidad se calculó mediante la fórmula 2.1:

$$R = \frac{Z * L^2}{6 * d} \quad (2.1)$$

**Formula 2.1.** Ecuación para la velocidad de ensayo de la norma ASTM- D790-17 [18].

R= Tasa de posición de la mordaza móvil (velocidad de ensayo), [mm/min]

L= Distancia entre apoyos, [mm]

d= Espesor de la probeta, [mm]

Z= Tasa de deformación de la fibra externa, mm/mm/min (Método A: Z= 0,01)

Se obtuvo que la velocidad para las probetas sin tratamiento es 1,36 [mm/min] y con tratamiento 1,35 [mm/min]. Los ensayos fueron realizados por el LANUM de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.



**Figura 2.21.** Ensayo de flexión.

La finalidad de este ensayo es evaluar el comportamiento dúctil de la probeta obteniendo propiedades como la resistencia a la flexión y su módulo de flexión.

### **Ensayo de dureza**

Otra propiedad principal para determinar el comportamiento mecánico de un elemento es la dureza. Esta se obtendrá por medio de un ensayo de dureza elaborado afín a los parámetros e indicaciones propuestas en la norma ASTM D2240-15 y fueron realizadas por el LANUM de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. Para que las probetas cumplan las características requeridas se las acondiciona utilizando lijas con talla 100, 180 y 240 y por último una hoja de papel hasta obtener ambas caras con una superficie libre de rugosidades permitiendo que la punta del durómetro tenga un completo contacto con la superficie a estudiar.

El equipo utilizado para el trabajo es un durómetro portátil de la marca Pantec el cual trabaja en la escala de dureza Shore D por medio de realizar indentaciones a 6 [mm] de distancia una de otra. En la Figura 2.22 se puede visualizar el equipo utilizado



**Figura 2.22.** Durómetro digital Pantec.

### 3 RESULTADOS

En este capítulo se expone los resultados procesados obtenidos de los múltiples ensayos mencionados en la metodología. En los cuáles se incluye los datos de propiedades de interés para este estudio y las macrográficas de las superficies antes y después del tratamiento térmico. Además, se realiza los cálculos pertinentes para determinar la diferencia que presenta el material tras entre los grupos CCT y STT.

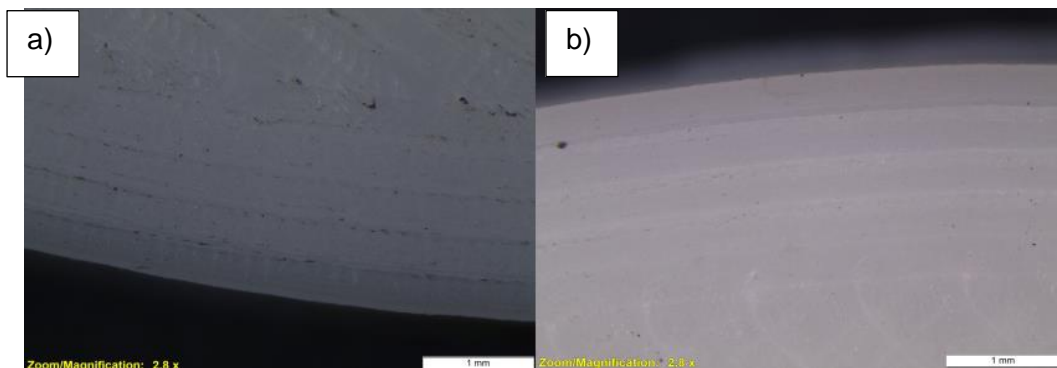
Los resultados obtenidos son verificados por los laboratorios LANUM y LMDF de la Escuela Politécnica Nacional, se adjunta los ensayos en los anexos I y II.

#### 3.1 Macrográficas

Se realizó 6 macrográficas, en 3 áreas diferentes, antes y después del tratamiento térmico, las macrográficas obtenidas se muestran en las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3.

- Para la zona de las paredes

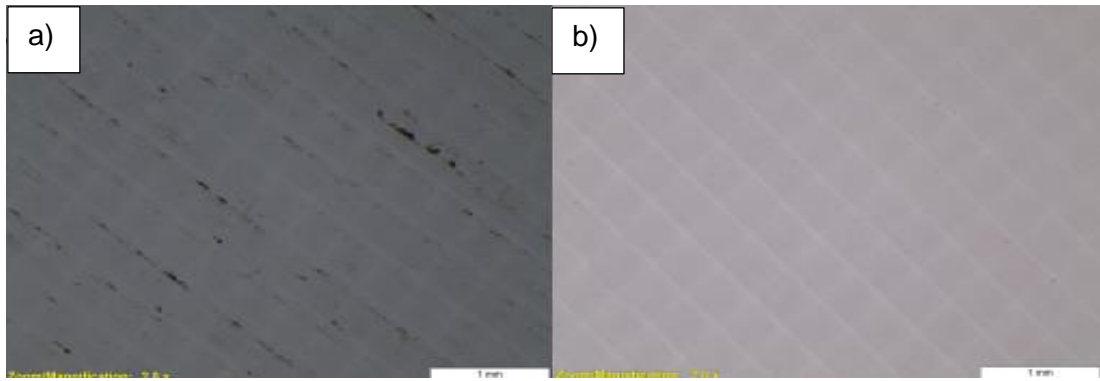
En la Figura 3.1 en las paredes de la probeta es posible identificar en los literales a) y b) la secuencia del filamento depositado durante el proceso de impresión. Se observa que no hay cambios geométricos, así como tampoco en la cantidad de líneas, sin embargo, en la Figura 3.1 a) se identifica una mayor presencia de impurezas o suciedad.



**Figura 3.1.** (a) Probeta del grupo CTT. (b) Probeta del grupo STT

- Para la zona del relleno

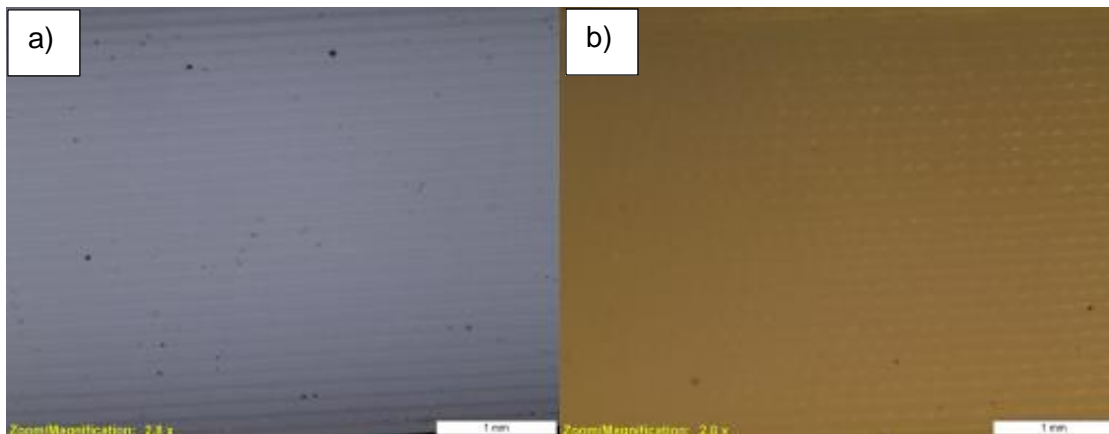
En la Figura 3.2 se identifica que se conserva en el patrón de impresión definido en los parámetros e impresión. El único cambio que se observa es en la Figura 3.2 a), donde se visualiza acumulación de impurezas.



**Figura 3.2.** (a) Probeta del grupo CTT. (b) Probeta del grupo STT

Para la zona lateral

En la Figura 3.3, se verifica que no hay cambio morfológico en la zona lateral. Sin embargo, en la Figura 3.3 a) hay presencia de suciedad en su superficie.



**Figura 3.3.** (a) Probeta del grupo CTT. (b) Probeta del grupo STT

### 3.2 Ensayos de tracción

Del ensayo de tracción realizado a las probetas se obtienen los diferentes resultados los cuales son promediados y se muestran en la tabla 3.1. Para ello se distribuyen de acuerdo con los grupos STT y CTT y se promedia los datos. Sin embargo, una probeta perteneciente al grupo CTT se fracturó fuera de la galga, por ende, su rotura no se considera para el análisis. Los valores desviación estándar se encuentran a lado de cada valor; los cálculos se reflejan en el anexo I.



**Tabla 3.1.** Resultados promediados del ensayo de tracción.

Grupo	Cantidad de muestras	Resistencia última (MPa)	Módulo de elasticidad secante (MPa)	Deformación a la rotura (%)
CTT	5	29.37 (1.2)	7347.354 (1021.99)	1.368 (0.6)
STT	5	28.912 (2.65)	7833.324 (1771.35)	1.116 (0.18)

Para realizar una comparativa de características entre los grupos STT y CTT y determinar el porcentaje de variación entre sus valores se utiliza la fórmula 3.1.

$$\frac{(V_f - V_i)}{V_i} * 100\% \quad (3.1)$$

**Ecuación 3.1.** Fórmula de variación porcentual.

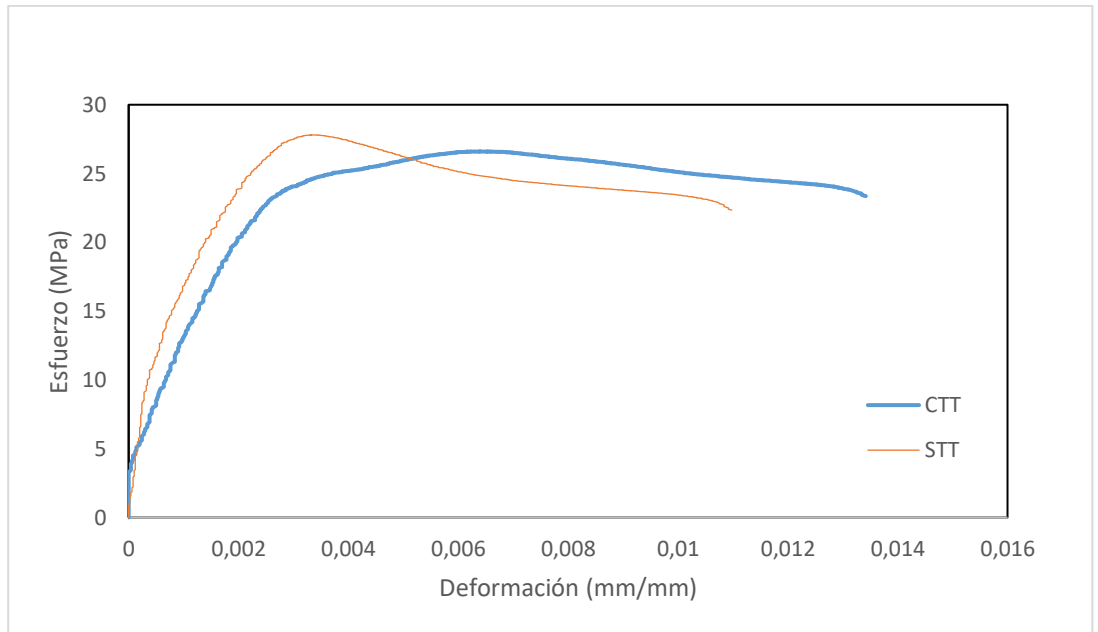
Donde:

$V_f$  : Valor final

$V_i$  : Valor inicial

De la información brindada por la tabla 3.1 se determina que el grupo CTT incrementó en 1.58% su resistencia última y un 22.58% su deformación a la rotura, mientras que, disminuyó en un 6.2% su módulo de elasticidad secante respecto al grupo STT.

Además, a partir de los datos obtenidos del ensayo también es posible definir gráfico esfuerzo-deformación promedio para ambos casos, el resultado se refleja en la Figura 3.4.



**Figura 3.4.** Curva esfuerzo-deformación promedio para probetas sin tratamiento térmico y con tratamiento térmico para tracción.

A partir de la Figura 3.4 se verifica lo que se menciona en la comparación de los resultados, puesto que, las probetas STT muestran un mayor módulo de elasticidad secante, pero, fallaron con una deformación menor.

Todas las probetas de tracción fueron llevadas al fallo, es decir hasta, que se fracturen. Se muestra la condición final de ambos lotes de probetas en las Figuras 3.5 y 3.6.



**Figura 3.5.** Probetas CTT tras el ensayo.





**Figura 3.6.** Probetas STT tras el ensayo.

### 3.3 Ensayos de flexión

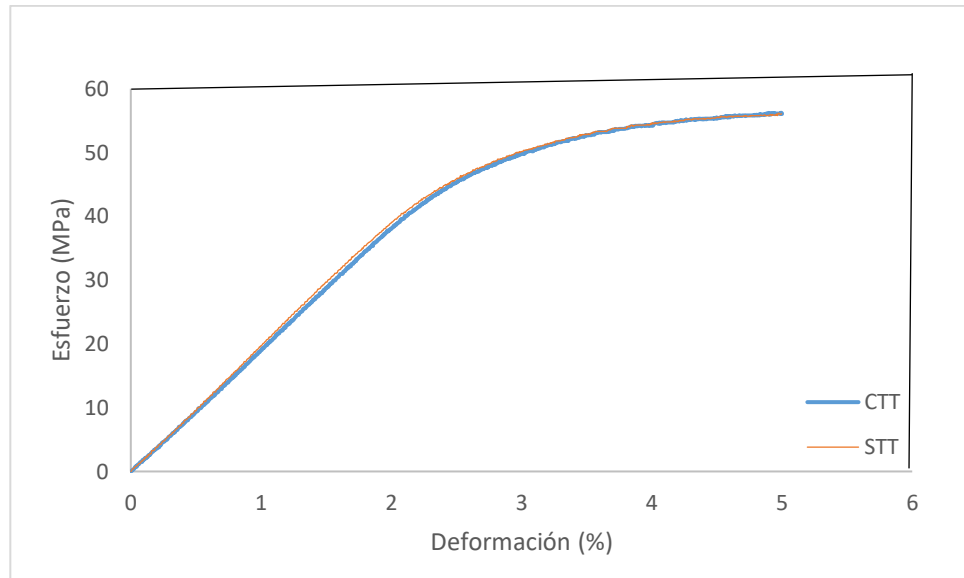
De realizar ensayos de flexión a los grupos CTT y STT se obtiene los resultados expresados en la Tabla 3.2. Donde la desviación estándar se incluye a la derecha de cada valor correspondiente.

**Tabla 3.2.** Resultados promediados del ensayo de flexión

Grupo	Cantidad de muestras	Resistencia última (MPa)	Módulo tangente (MPa)
CTT	5	56.208 (1.39)	1942.838 (66.54)
STT	5	56.176 (1.35)	1993.668 (79.35)

Se aplica la ecuación 3.1 en los datos presentados en la tabla 3.2 para determinar el cambio porcentual entre los ambos grupos. Se obtiene que el grupo CTT aumentó su resistencia última en un 0.06% y disminuyó su módulo tangente en un 2.55%.

De los ensayos se consiguió la información necesaria para determinar la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación generada. Se promedió los datos y se generó una gráfica que represente a cada grupo. La gráfica esfuerzo-deformación se expone en la Figura 3.7, se integran ambas relaciones en una sola gráfica para facilitar la comparativa.



**Figura 3.7.** Curva esfuerzo-deformación promedio para probetas sin tratamiento térmico y con tratamiento térmico para flexión.

En la Figura 3.7 se percibe que los cambios son mínimos. Tal como respalda los cálculos realizados.

El ensayo de flexión se restringió a una deformación en específico. Ambos lotes quedaron permanentemente deformados y se visualiza las probetas deformadas plásticamente tras el ensayo en las Figuras 3.8 y 3.9.



**Figura 3.8.** Probetas con tratamiento térmico tras el ensayo.



**Figura 3.9.** Probetas sin tratamiento térmico tras el ensayo.

### 3.4 Ensayos de dureza

Se realizó 5 indentaciones a cierta distancia establecida cuyas lecturas se enlistan en la tabla 3.3 para el grupo STT y en la tabla 3.4 para el grupo CTT y se realiza el promedio para cada grupo. Además, se muestra la desviación estándar de cada uno en sus respectivas tablas.

**Tabla 3.3.** Dureza del grupo de probetas CTT y STT.

<b>DUREZA SHORE D</b>			
<b>Muestra</b>	<b>Dureza (Shore D)</b>	<b>Muestra</b>	<b>Dureza (Shore D)</b>
CTT	87,9	STT	79,3
	86,7		77,5
	87,2		76,6
	86,2		78,0
	88,6		77,5
Promedio	87,3	Promedio	77,8
Desviación estándar	1,0	Desviación estándar	1,0
Coficiente de variación	1,1	Coficiente de variación	1,3

Tomando las durezas promedio de cada grupo y aplicando la ecuación 3.1 se calcula que el grupo CTT aumentó su dureza en un 12.26% respecto al grupo STT.

## **4 ANALISIS DE RESULTADOS**

En esta sección, llevaremos a cabo un análisis detallado de los datos presentados en la sección anterior, con el objetivo de entender los fenómenos y circunstancias que sustentan las afirmaciones realizadas. Este análisis se realizará a través de la comparación con estudios previos realizados por otros autores y libros especializados en el tema de los polímeros y los tratamientos térmicos.

### **4.1 Impacto en la Estructura y Propiedades de los Polímeros**

Inicialmente, observamos las macrografías de las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3, donde no se aprecian cambios visibles en los patrones de impresión, el número de líneas provenientes del proceso de impresión ni en la coloración del filamento. Este resultado sugiere que el tratamiento térmico aplicado no tuvo un impacto significativo en la estructura superficial del polímero.

Es importante destacar que la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) del material es inferior a la temperatura de fusión, momento en el cual la degradación del material es más rápida. Sin embargo, a pesar de que el material se ablandó durante el tratamiento térmico, no se observaron cambios sustanciales en estas propiedades físicas. Además, el tiempo utilizado en el tratamiento no fue suficiente para inducir coloraciones debido a la degradación.

Un estudio previo realizado por Tiganis et al. [13] detalla cómo el ABS se deteriora con un mayor lapso de exposición a altas temperaturas. Dado que el tiempo de tratamiento en nuestro estudio fue de 5 horas, podemos inferir que no se observaron cambios significativos en las propiedades físicas mencionadas, lo que sugiere una conservación de las cualidades del material.

### **4.2 Propiedades Mecánicas**

Respecto a las propiedades mecánicas, se realizaron ensayos de tracción en el grupo de probetas CTT. Se observó un aumento del 1,58% en su resistencia última y un 22,58% en su deformación a la rotura, mientras que el módulo de elasticidad disminuyó un 6,2% en comparación con el grupo de probetas STT. Este comportamiento es coherente con el trabajo de Tiganis et al. [13], donde se observó un comportamiento similar en las propiedades de tracción debido a la degradación del material. Exponer el polímero a altas temperaturas aumenta su degradación, lo

que impacta en sus propiedades de tracción. Además, se especifica que la degradación es principalmente superficial, lo que sugiere que esta capa afectada por el tratamiento térmico puede ayudar a soportar cargas paralelas a la superficie.

Para los ensayos de flexión, se determinó que el grupo CTT presentó un aumento del 0.06% en su resistencia última y una disminución del módulo tangente en un 2.55%. Esto indica un cambio reducido en las propiedades de flexión de las probetas con el tratamiento térmico, lo cual es coherente con el hecho de que este tratamiento solo tiene repercusión en la superficie del material. Los esfuerzos cortantes a los que se somete la probeta son perpendiculares a su superficie, lo que implica que el cambio en su capa externa no provoque un gran cambio en sus propiedades.

### **4.3 Dureza Superficial y Aplicaciones Potenciales**

Una de las características más peculiares del procedimiento fue el incremento significativo en la dureza superficial, alcanzando un aumento del 12.26%. Este resultado es consistente con estudios previos, como el realizado por Delgado [24], donde se aclara que los polímeros, al ser sometidos a un tratamiento térmico, pueden experimentar un aumento de la cristalinidad y una reducción de la región amorfa. Esto implica que las cadenas poliméricas presentan un mayor grado de orden, lo que se traduce en un aumento de la dureza y fragilidad del material. Esta observación se fundamenta en explicaciones anteriores sobre el ABS en el libro de Harper et al. [1].

### **4.4 Implicaciones y Futuras Direcciones**

La aplicación de la impresión 3D es cada vez más frecuente en una amplia variedad de aplicaciones industriales y domésticas. Este estudio plantea la posibilidad de modificar las propiedades mecánicas del material mediante tratamientos térmicos, con el fin de ampliar su versatilidad y aplicabilidad. Por ejemplo, la capacidad de soportar una mayor deformación antes de fracturarse y su mayor dureza pueden hacer que el material sea adecuado para su uso en maquetas de máquinas, fabricación de juguetes, decoración, utensilios para el hogar, entre otros usos. Esto sugiere un campo prometedor para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en el ámbito de la fabricación de polímeros.

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

- Aplicar el tratamiento térmico por 5 horas en las probetas de ABS no presenta cambios representativos en su superficie. Conserva las propiedades físicas como los patrones impresión, la coloración, etc.
- Se determina en los ensayos de tracción y flexión que el grupo con tratamiento térmico presenta un aumento del 1,58% en resistencia última a tracción, 22,58% en deformación a la rotura y 0.06% en su resistencia última a flexión, pero una disminución del 6,2% en el módulo de elasticidad y 2.55% de módulo respecto al grupo sin tratamiento térmico.
- La capa superficial con mayor cristalinidad favorece la resistencia a las cargas paralelas a la superficie, pero, sin surtir efecto en las cargas perpendiculares. Como se aprecian en las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3.
- La dureza en las probetas con tratamiento térmico presenta un incremento del 12.26%. Esto se relaciona con el aumento de cristalinidad en la superficie de las probetas.
- El tratamiento térmico del ABS es una técnica prometedora para mejorar las propiedades del material y ampliar su aplicabilidad en la impresión 3D. Se espera que esta tecnología tenga un impacto significativo en la fabricación de piezas de alta calidad y durabilidad para diversos sectores industriales.

### 5.2 Recomendaciones

- Tanto en el proceso de impresión y de TT uno de los problemas más frecuentes era la deformación de las probetas a causa de una alta velocidad de enfriamiento. Se recomienda realizar un estudio más profundo sobre los diferentes métodos para controlar el enfriamiento en polímeros.
- No estar expuestos a los gases de impresión por una larga cantidad de tiempo en lugares sin una ventilación adecuada.
- Se recomienda utilizar microscopía electrónica para ampliar el estudio y verificar el tipo de cambios en la superficie.

- Es posible extender el estudio empleando diferentes porcentajes de rellenos para la impresión de las piezas.
- Se recomienda utilizar un mayor intervalo de tiempo para el tratamiento térmico para verificar si al aumentar el tiempo se generará cambios en la estructura.
- Se recomienda construir una caja con extracción de aire. Para controlar el enfriamiento y reducir la exposición a gases peligrosos para la salud.

## 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Harper Charles, *Harper, C.A. (2006). Handbook of Plastics Technologies: The Complete Guide to Properties and Performance.*, 2nd edition. Lowell, Massachusetts: McGraw Hill, 2006.
- [2] D. R. Askeland y W. J. Wright, *Ciencia e ingeniería de materiales*, 7ª edición. Cengage Learning, 2016.
- [3] ECUCEI, “Aplicaciones de los polímeros”. Consultado: el 5 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://ecucei.com/polimeros/introduccion/1-9-aplicaciones-de-los-polimeros/>
- [4] B. Rodríguez, “ESTUDIO SOBRE LA OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FABRICACIÓN EN UNA IMPRESORA 3D CON TECNOLOGÍA FDM”, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2017.
- [5] J. Morales, “OPTIMIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE IMPRESIÓN 3D”, Valladolid, oct. 2020.
- [6] E. Idrach, “ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE IMPRESIÓN 3D PARA UNA MAYOR TENACIDAD A FRACTURA EN PROBETAS IMPRESAS EN PLA CON PARTÍCULAS DE MADERA”, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2020.
- [7] A. Marchante, “Los patrones de relleno en la impresión 3D, ¿qué tipos hay y para qué se utilizan?” Consultado: el 14 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/guia-patrones-relleno-impresion-3d-170720232/#!>
- [8] Filament2print, “La importancia del tipo de relleno en impresión 3D”. Consultado: el 14 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://filament2print.com/es/blog/71\\_importancia-relleno-impresion-3d.html](https://filament2print.com/es/blog/71_importancia-relleno-impresion-3d.html)
- [9] 3Dbuilders, “Explicación de los 4 tipos de impresoras 3D FDM (cartesiano, delta, polar y escara)”. Consultado: el 14 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://3dbuilders.pro/explicacion-de-los-4-tipos-de-impresoras-3d-fdm-cartesiano-delta-polar-y-escara/>
- [10] Formlabs, “Guía de materiales de impresión 3D: Tipos, aplicaciones y propiedades”. Consultado: el 15 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://formlabs.com/es/blog/materiales-impresion-3d/>
- [11] M. Becerra-Rodríguez, V. J. Aguilar-Díaz, y J. Bernardino-González, “Tratamientos térmicos”, *Publicación semestral*, vol. 8, núm. 15, pp. 40–44, 2021, [En línea]. Disponible en: <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/tepexi/issue/archive>
- [12] E. de Avila, J. Eo, J. Kim, y N. P. Kim, “Heat Treatment Effect on Mechanical Properties of 3D Printed Polymers”, *MATEC Web of Conferences*, vol. 264, p. 02001, 2019, doi: 10.1051/mateconf/201926402001.
- [13] B. E. Tiganis, L. S. Burn, P. Davis, y A. J. Hill, “Thermal degradation of acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) blends”, *ELSEVIER*, Victoria, el 27 de enero de 2002. [En línea]. Disponible en: [www.elsevier.com/locate/polydegstab](http://www.elsevier.com/locate/polydegstab)



- [14] J. Ilachoque, "Tratamientos Térmicos de Polímeros". Consultado: el 13 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/433010786/Tratamientos-Termicos-de-Polimeros-Resumen-Max>
- [15] SUNLU, "FDM 3D Printer Filament Resin Safety Data Sheet (SDS) Safety Data Sheet (SDS) According to GHS", 2017.
- [16] ASTM, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics", doi: 10.1520/D0638-22.
- [17] ASTM, "Standard Test Method for Indentation Hardness of Rigid Plastics by Means of a Barcol Impressor", doi: 10.1520/D2583-13A.
- [18] ASTM, "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials", doi: 10.1520/D0790-17.
- [19] L. Contreras, "Guía completa: El filamento de ABS en la impresión 3D". Consultado: el 12 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/filamento-de-abs-impresion-3d-06062019/>
- [20] Impresoras3d, "Un repaso a los trucos más usados para imprimir en ABS". Consultado: el 12 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.impresoras3d.com/un-repaso-a-los-trucos-mas-usados-para-imprimir-en-abs/>
- [21] Fabrix3D, "Cómo imprimir en ABS". Consultado: el 12 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fabrix3d.com/post/c%C3%B3mo-imprimir-en-abs>
- [22] Creality, "Ender-5 Pro 3D Printer". Consultado: el 28 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.creality.com/es/products/ender-5-pro-3d-printer?cfb=52f98908-e612-4cda-8744-f070299fc2d2&ifb=52f98908-e612-4cda-8744-f070299fc2d2&scm=search.v39.101.102.103.104&score=59.222452428337874&ssp=>
- [23] A. Delgado Fernández, "Estudio de la aplicación de tratamientos térmicos post-procesado para la mejora de propiedades mecánicas de una mezcla de sulfuro de polifenileno, politetrafluoretileno y fibra de carbono", Valencia, mar. 2022.
- [24] SNOL, "SNOL 30/1100 LSF01 | SNOL". Consultado: el 13 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://snol.com/product/snol-30-1100-lsf01/>
- [25] H. Villacís y G. V. Salazar, "OBTENCIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS HÍBRIDOS DE MATRIZ POLIÉSTER REFORZADOS CON FIBRA DE VIDRIO Y ABACÁ MEDIANTE ESTRATIFICACIÓN", Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2011.
- [26] Tinius Olsen, "L-Series Tensile Test Machines". Consultado: el 13 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: [www.tiniusolsen.com](http://www.tiniusolsen.com)

## 7 ANEXOS

Para la sección de anexos se agrega los informes recibidos que certifican la realización de los ensayos en los laboratorios mencionados y también se expone de manera detallada los datos obtenidos y las condiciones ambientales en las que se realizó los ensayos.

### ANEXO I. Informe de los ensayos de flexión, tracción y dureza



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)**  
Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño  
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000, 3002, 3735  
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



#### INFORME DE RESULTADOS No. II-2024-002

Orden de trabajo Nro. DT-OTI0085-2024

Quito, 25 de enero de 2024

#### DATOS DE LA EMPRESA/INSTITUCIÓN SOLICITANTE

Solicitado por: Ing. Carlos Díaz, M.Sc.  
Empresa / Institución: EPN-FIM-DMT  
Teléfono: 2976-300 ext. 3004  
Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía  
E-mail: [carlos.diaz@epn.edu.ec](mailto:carlos.diaz@epn.edu.ec)

#### Identificación de la(s) muestra(s) (cliente):

- STT-T (5 probetas para tracción)
- CTT-T (5 probetas para tracción)
- STT-F (5 probetas para flexión)
- CTT-F (5 probetas para flexión)
- STT-D (1 probeta para dureza)
- CTT-D (1 probeta para dureza)

#### Descripción de la(s) muestra(s):

Probetas de ABS obtenidas por impresión 3D sin y con tratamiento térmico.

#### LABORATORIO

Fecha de ingreso al Laboratorio: 15/01/2023

#### Identificación de la(s) muestra(s) (código LANUM):

#### Para los ensayos de tracción:

- 24-85-01 a 24-85-05 para las probetas "STT-T"
- 24-85-12 a 24-85-16 para las probetas "CTT-T"

#### Para los ensayos de flexión:

- 24-85-06 a 24-85-10 para las probetas "STT-F"
- 24-85-17 a 24-85-21 para las probetas "CTT-F"

#### Para los ensayos de dureza Shore D:

- 24-85-11 para la probeta "STT-D"
- 24-85-22 para la probeta "CTT-D"

#### Fechas en que se realizaron los ensayos:

Tracción: 17/01/2024  
Flexión: 22/01/2024  
Dureza: 18/01/2024

F-PT-07-05

Página 1 de 9



## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño  
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000, 3002, 3735  
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



Área del laboratorio donde se realizó el ensayo:  
Área de caracterización mecánica

### Condiciones ambientales

En la tabla 1 se reportan las condiciones ambientales corregidas para las fechas en que se realizaron los ensayos de tracción, flexión y de dureza.

**Tabla 1.** Condiciones ambientales corregidas en las fechas que se realizaron los ensayos de tracción, flexión y dureza.

Id. Muestra	Fecha	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Humedad inicial (% HR)	Humedad final (% HR)
"STT-T-01 a STT-T-05" 24-85-01 a 24-85-05	17/01/2024	20,3	20,3	52,3	52,2
"CTT-T-01 a CTT-T-05" 24-85-12 a 24-85-16	17/01/2024	20,3	20,4	52,7	52,6
"STT-D-01 y CTT-D-01" 24-85-11 y 24-85-22	18/01/2024	20,3	20,1	56,2	55,8
"STT-F-01 a STT-F-05" 24-85-06 a 24-85-10	22/01/2024	20,8	21,1	45,4	43,3
"CTT-F-01 a CTT-F-05" 24-85-17 a 24-85-21	22/01/2024	21,1	21,3	43,6	43,4

### EQUIPOS UTILIZADOS

- Máquina universal de ensayos marca: Tinius Olsen, modelo: H25KS; capacidad máxima 25 KN; precisión utilizada: 0,01 N. Utilizado para medir las propiedades a tracción y flexión de las probetas poliméricas.
- Calibrador de vernier marca: Mitutoyo, modelo: Absolute Digimatic (12"/300 mm) con una apreciación de 0,01 mm. Utilizado para medir las longitudes de las probetas de tracción y flexión.
- Micrómetro analógico marca: Mitutoyo, modelo: 103-104, con una apreciación de 0,01 mm. Utilizado para medir el ancho y espesor de las probetas de tracción y flexión.
- Durómetro portátil sin banco de prueba en escala Shore D Pantec modelo HT-6510D; rango: 10-90 HD, resolución: 0,1, desviación de la medida: error  $\leq \pm 1$ . Utilizado para medir dureza Shore D en las probetas poliméricas.
- Termohigrómetro marca ELITECH, modelo RCW-800 wifi con una apreciación de 0,1 °C y 0,1 %HR. Utilizado para medir y registrar las condiciones ambientales durante los ensayos mecánicos.



## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño  
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000, 3002, 3735  
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



### MÉTODO EMPLEADO

#### 1. Ensayos de tracción, tomando como referencia la norma ASTM D638-14:

El método empleado es el descrito en la norma ASTM D638-14, salvo por las condiciones ambientales para acondicionar las muestras y ejecutar los ensayos, mismas que no pueden ser controladas por el laboratorio.

- Tipo de probeta: IV.
- Distancia calibrada para medir la deformación: 25 mm.
- Velocidad de ensayo: 5 mm/min.
- Fin del ensayo: cuando se hayan roto las probetas.

#### 2. Ensayos de flexión, tomando como referencia la norma ASTM D790-17:

El método empleado es el descrito en la norma ASTM D790-17, salvo por las condiciones ambientales para acondicionar las muestras y ejecutar los ensayos que no pueden ser controlados por el laboratorio.

- Relación entre el espesor y la distancia entre apoyos: 1:16
- Fin del ensayo: cuando las probetas se hayan deformado hasta un 5% o si se rompen antes de esa deformación.
- Velocidad de ensayo:

La velocidad de ensayo o tasa de posición del cabezal móvil de la máquina universal de ensayos está dada por la ecuación 1 de la norma ASTM D790-17 en la página 5 de dicha norma.

$$R = \frac{ZL^2}{6d} \quad (1)$$

Donde:

R= Tasa de posición de la mordaza móvil (velocidad de ensayo), mm/min

L= Distancia entre apoyos, mm

d= Espesor de la probeta, mm

Z= Tasa de deformación de la fibra externa, mm/mm/min (Método A: Z= 0,01)

De acuerdo a la expresión descrita anteriormente se obtuvo las velocidades de ensayo para los grupos de probetas:

"STT-F" (24-85-06 a 24-85-10): 1,36 mm/min

"CTT-F" (24-85-17 a 24-85-21): 1,35 mm/min

#### 3. Medición de dureza en escala Shore D:

Para el ensayo de dureza en escala Shore D se procedió a tomar cinco mediciones en puntos diferentes alejados al menos 6 mm de los bordes y entre sí de las probetas de flexión.



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)**

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricuarte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño  
 RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000, 3002, 3735  
 Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



**RESULTADOS**

**1. Ensayos de tracción tomando como referencia la norma ASTM D638-14:**

En las Tablas 2 y 3 se presentan los resultados de los ensayos de resistencia a tracción tomando como referencia la norma ASTM D638-14 para las probetas poliméricas de los grupos "STT-T" y "CTT-T" respectivamente.

**Tabla 2.** Resultados del ensayo de tomando como referencia la norma ASTM D638-14 para las probetas del grupo "STT-T".

ENSAYO DE TRACCIÓN ASTM D638-14 (Grupo: STT-T)								
Muestra No.	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga última (N)	Resistencia última (MPa)	Módulo de elasticidad secante (MPa)	Deformación última (%)	Deformación a la rotura (%)
STT-T-01 24-85-01	6,01	3,96	23,79	619,17	26,03	9556,86	0,36	1,36
STT-T-02 24-85-02	6,03	3,91	23,60	665,00	28,18	9857,44	0,36	1,03
STT-T-03 24-85-03	6,09	3,95	24,08	665,00	27,62	6695,64	0,34	1,22
STT-T-04 24-85-04	6,11	3,91	23,91	710,00	29,69	5902,69	0,26	0,88
STT-T-05 24-85-05	6,07	3,93	23,89	789,17	33,04	7153,99	0,34	1,09
	Promedio		$\bar{x}$	689,67	28,91	7833,32	0,33	1,12
	Desviación estándar		$S_{n-1}$	64,23	2,65	1771,35	0,04	0,18
	Coficiente de variación		CV (%)	9,31	9,18	22,61	12,49	16,41

En la figura 1. Se presentan las condiciones finales de las probetas del grupo "STT-T" después de los ensayos de tracción.





## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño  
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000, 3002, 3735  
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



**Figura 1.** Condiciones finales de las probetas del grupo "STT-T" después de los ensayos de tracción tomando como referencia la norma ASTM D638-14.

**Tabla 3.** Resultados del ensayo de tracción tomando como referencia la norma ASTM D638-14 para las probetas del grupo "CTT-T".

ENSAYO DE TRACCIÓN ASTM D638-14 (Grupo: CTT-T)								
Muestra No.	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga última (N)	Resistencia última (MPa)	Módulo de elasticidad secante (MPa)	Deformación última (%)	Deformación a la rotura (%)
CTT-T-01 24-85-12	6,33	3,96	25,06	710,00	28,33	6231,19	0,41	2,22
CTT-T-02 24-85-13	6,08	4,02	24,41	703,33	28,82	7823,58	0,45	0,81
CTT-T-03 24-85-14	5,90	4,01	23,65	741,67	31,37	8749,28	0,42	1,76
CTT-T-04 24-85-15	6,25	3,98	24,89	715,83	28,76	6492,26	0,34	1,09
CTT-T-05 24-85-16	6,38	3,90	24,88	735,83	29,57	7440,46	0,43	0,96
Promedio			$\bar{x}$	721,33	29,37	7347,35	0,41	1,37
Desviación estándar			$S_{n-1}$	16,63	1,20	1021,99	0,04	0,60
Coefficiente de variación			CV (%)	2,31	4,10	13,91	10,20	43,78



## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño  
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000, 3002, 3735  
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



En la figura 2. Se presentan las condiciones finales de las probetas del grupo "CTT-T" después de los ensayos de tracción.



**Figura 2.** Condiciones finales de las probetas del grupo "CTT-T" después de los ensayos de tracción tomando como referencia la norma ASTM D638-14

### **2. Ensayos de flexión, tomando como referencia la norma ASTM D790-17:**

En las Tablas de la 4 a la 5 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de flexión tomando como referencia la norma ASTM D790-17 para los grupos de probetas "STT-F" y "CTT-F" respectivamente.



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)**

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica 5/N y Alfredo Mena Caamaño  
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000, 3002, 3735  
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



**Tabla 4.** Resultados de los ensayos de flexión basado en ASTM D790-17 para las probetas del grupo "STT-F".

ENSAYO DE FLEXIÓN ASTM D790-17 (Grupo: STT-F)								
Muestra No.	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Distancia entre apoyos (mm)	Carga última (N)	Resistencia última (MPa)	Deformación última (%)	Módulo tangente (MPa)
STT-F-01 (24-85-06)	12,82	3,18	40,78	50,88	94,17	55,42	5,00	1887,72
STT-F-02 (24-85-07)	12,83	3,19	40,93	51,04	92,50	54,24	5,00	1934,26
STT-F-03 (24-85-08)	12,58	3,21	40,33	51,36	96,67	57,59	5,00	2019,80
STT-F-04 (24-85-09)	12,63	3,20	40,38	51,20	95,00	56,52	5,00	2057,86
STT-F-05 (24-85-10)	12,59	3,17	39,92	50,72	95,00	57,11	5,00	2068,70
Promedio				$\bar{x}$	94,67	56,18	5,00	1993,67
Desviación estándar				$S_{n-1}$	1,51	1,35	0,00	79,35
Coeficiente de variación				CV	1,60	2,41	0,00	3,98

**Tabla 5.** Resultados de los ensayos de flexión basado en ASTM D790-17 para las probetas del grupo "CTT-F".

ENSAYO DE FLEXIÓN ASTM D790-17 (Grupo: CTT-F)								
Muestra No.	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Distancia entre apoyos (mm)	Carga última (N)	Resistencia última (MPa)	Deformación última (%)	Módulo tangente (MPa)
CTT-F-01 (24-85-17)	12,57	3,19	40,14	51,04	90,83	54,25	5,00	1829,13
CTT-F-02 (24-85-18)	12,58	3,15	39,59	50,40	93,33	56,65	5,00	1954,81
CTT-F-03 (24-85-19)	12,60	3,22	40,61	51,52	94,17	55,59	5,00	1952,05
CTT-F-04 (24-85-20)	12,54	3,14	39,34	50,24	95,00	58,01	5,00	1977,46
CTT-F-05 (24-85-21)	12,60	3,18	40,02	50,88	94,17	56,54	5,00	2000,74
Promedio				$\bar{x}$	93,50	56,21	5,00	1942,84
Desviación estándar				$S_{n-1}$	1,61	1,39	0,00	66,54
Coeficiente de variación				CV	1,72	2,48	0,00	3,42





## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño  
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000, 3002, 3735  
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



### 3. Ensayos de dureza en escala Shore D:

En las Tabla 6 y 7 se presentan los resultados obtenidos de la medición de dureza en escala Shore D para las probetas "STT-D-01" y "CTT-D-01" respectivamente.

**Tabla 6.** Resultados de medición de dureza en escala Shore D para la muestra "STT-D-01"

DUREZA SHORE D	
Muestra No.	Dureza (Shore D)
STT-D-01 (24-85-11)	79,3
	77,5
	76,6
	78,0
	77,5
Promedio	77,8
Desviación estándar	1,0
Coefficiente de variación	1,3

**Tabla 7.** Resultados de medición de dureza en escala Shore D para la muestra "CTT-D-01"

DUREZA SHORE D	
Muestra No.	Dureza (Shore D)
CTT-D-01 (24-85-22)	87,9
	86,7
	87,2
	86,2
	88,6
Promedio	87,3
Desviación estándar	1,0
Coefficiente de variación	1,1

Los archivos digitales respaldo de los resultados de los ensayos de tracción y flexión se adjuntan al presente informe.

"El cliente puede hacer uso académico de los resultados presentados en este informe, así como de los respaldos enviados en formato digital para su tratamiento".

NOTA: ESTOS RESULTADOS ESTÁN RELACIONADOS ÚNICAMENTE A LA(S) MUESTRA(S) SOMETIDA(S) A ENSAYO.

NOTA DE DESCARGO DE RESPONSABILIDAD: En caso de que las muestras entregadas no cumplieran con las especificaciones solicitadas por el LANUM (dimensiones, cantidad de muestra), y a pesar de eso el cliente diera su consentimiento para la realización de análisis, el



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)**

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño  
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000, 3002, 3735  
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



**LANUM no se responsabiliza si los resultados son afectados debido a estas desviaciones (no cumplimiento de especificaciones)**

Realizado por:

Ing. Orlando Campaña  
Analista Técnico


Revisado y aprobado por:

Dra. Karina Lagos  
Responsable Técnica

Autorizado por:

Dra. Paulina Romero  
Coordinadora del LANUM

## ANEXO II. Informe de las macrografías

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000	
		Fecha: 22/09/2019	
		Página: Pág. 1 de 2	
	INFORME DE RESULTADOS N° OTI0089-24	RT-LMDF-0701	

### INFORME DE RESULTADOS N° OTI0089-24

#### Información General

<b>Cliente / Empresa/ Entidad:</b>	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL		
<b>Persona de contacto:</b>	Ing. Carlos Diaz		
<b>Teléfono:</b> 0995108334	<b>E-mail:</b>	carlos.diaz@epn.edu.ec	
		walter.macias@epn.edu.ec	
<b>Muestras suministradas por:</b>	Walter Macías	<b>Fecha de recepción de muestra:</b>	09-01-2024
<b>Fecha de emisión de Informe:</b>	22/01/2024	<b>Fecha/ plan y método de muestreo:</b>	N/A
<b>Fecha de inicio de ensayo:</b>	09-01-2024	<b>Fecha de fin de ensayo:</b>	15-01-2024

#### 1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la Escuela Politécnica Nacional, probetas de polímero ABS, para realizar tratamiento térmico, de 20 probetas, dentro de cajas de acero y también obtener 6 macrografías. Memorando Nro. EPN-DMT-2023-1463-M



#### 2. DESCRIPCIÓN DE MUESTRA

Probetas de polímero ABS de color blanco.

#### 3. DETALLE DE ENSAYOS REALIZADOS:

Se realizo en el horno de altas temperaturas el ensayo de tratamiento térmico de acuerdo con la solicitud del cliente.

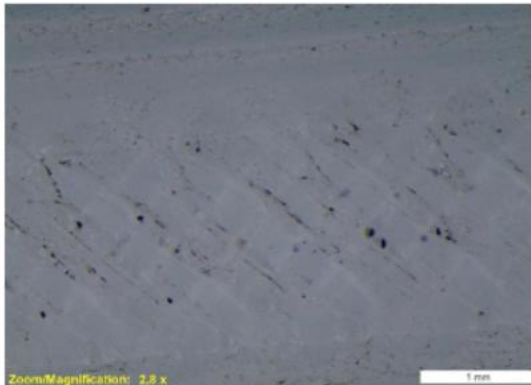
Antes y después del tratamiento se realizaron los ensayos de macrografía

	<b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b> Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión:	000	
		Fecha:	22/09/2019	
		Página:	Pág. 2 de 2	
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>		<b>RT-LMDF-0701</b>	
N° OTI0089-24				

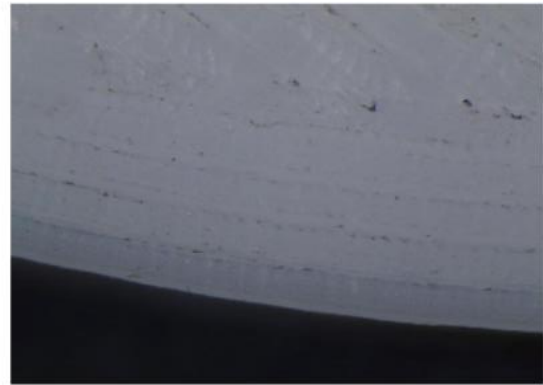
#### 4. MACROGRAFÍAS OBTENIDAS

La preparación de las probetas para el ensayo lo realizó el cliente, las macrografías realizadas son en el sentido especificado por el cliente, a continuación, se presenta las fotografías más representativas del ensayo:

**24-005**



Centro del elemento aumento de 28X



Pared del elemento aumento de 28X

#### DECLARATORIA:

- Los resultados de este informe, se aplican al objeto de ensayo como se recibió y son exclusivos del mismo.
- Este informe de resultados no debe ser reproducido parcialmente, excepto cuando se reproduzca en su totalidad y con aprobación escrita del LMDF.
- Los ensayos solicitados se han realizado en las instalaciones del LMDF.

#### Atentamente:

Informe

Elaborado por:



Ing. Patricia Proaño  
**Responsable Técnico del Laboratorio de  
 Metalografía, Desgaste y Falla.**

Aprobado por:



Ing. Verónica Sotomayor  
**Coordinadora del Laboratorio de  
 Metalografía, Desgaste y Falla.**