

## Efecto del tratamiento térmico en la resistencia cohesiva de capas de probetas impresas con ABS mediante tecnología MDF

Camarillo Silva Mariana<sup>1</sup>, López Frías Karen Dioney<sup>1</sup>, Moreno Palmerín Joel<sup>1</sup>, López Báez Israel<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato. Ex-Hacienda de San Matías s/n; C.P.36020; Guanajuato, Gto.  
m.camarillosilva@ugto.mx, kd.lopezfrias@ugto.mx, jmoreno@ugto.mx, israel.baez@ugto.mx

### Resumen

Este trabajo de investigación estudia el efecto del tratamiento térmico sobre la resistencia cohesiva entre capas impresas de probetas fabricadas mediante modelado por deposición fundida utilizando el termoplástico ABS. Las probetas se colocaron dentro de un molde cilíndrico rodeado de partículas metálicas esféricas que ejercieron una presión uniforme en éstas; el propósito fue restringir el incremento excesivo de sus dimensiones y favorecer la interacción de cadenas poliméricas durante el tratamiento térmico. Las temperaturas de los tratamientos térmicos fueron 85°, 90° y 95°C durante 10, 15 y 20 horas, respectivamente. Las probetas fueron cuadrangulares con patrón de relleno cúbico y parámetros optimizados para incrementar la unión entre capas impresas (50% de superposición de relleno). Los ensayos de compresión mostraron que el tratamiento térmico incrementó significativamente la unión entre capas impresas disminuyendo con esto la falla por cizallamiento. Las probetas tratadas a temperaturas cercanas a la temperatura vítreo del polímero ABS mostraron mayor relajación de esfuerzos, así como mayor resistencia cohesiva, tanto que, la falla por cizallamiento se evidenció hasta llegar a una reducción aproximada de 12 mm y en otra cara de la probeta. La condición de tratamiento térmico a 90 °C por 20 horas evidenció un balance entre resistencia a la compresión y deformación aceptable (-3.09% en  $x$ , -1.77% en  $y$ , -3.42% en  $z$ ). Finalmente, las mediciones de dureza Shore D han evidenciado más un cambio en las propiedades físicas del polímero debido al tratamiento térmico a 85°C incrementando su dureza alrededor de 3 unidades.

**Palabras clave:** Resistencia cohesiva, Tratamiento térmico, Impresión 3D, ABS.

### Introducción

La tecnología de modelado por deposición fundida (MDF) es una herramienta importante en la fabricación rápida de piezas en 3 dimensiones (3D) de piezas funcionales gracias a su relativo bajo costo, facilidad de uso y capacidad de producir piezas con geometrías complejas a base de materiales termoplásticos<sup>1</sup>. Esta tecnología ha demostrado ser de amplia utilidad para la industria, educación e investigación<sup>2</sup>. Entre los materiales poliméricos más utilizados para la impresión 3D está el poliácido láctico conocido como PLA y el acrilonitrilo butadieno estireno conocido como ABS por sus siglas en inglés, siendo este último uno de los más utilizados en la industria debido a su equilibrio entre tenacidad, resistencia térmica, y facilidad de procesamiento. El ABS está compuesto por tres monómeros: el acrilonitrilo, que le aporta rigidez y resistencia química; el butadieno, que le proporciona resistencia al impacto; y el estireno, que mejora la procesabilidad y apariencia superficial.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Cano Vicent et al., 2021.

<sup>2</sup> Ortiz Gil, 2019.

Uno de los principales retos de la impresión con tecnología MDF usando ABS es la baja cohesión entre fibras, principalmente entre las fibras apiladas que forman las capas, una vez que éstas han comenzado a enfriarse. Esta situación limita la difusión o interacción de cadenas poliméricas entre capas, lo que resulta en zonas débiles que provocan marcada anisotropía en las propiedades mecánicas<sup>4</sup>. Además, el ABS presenta un comportamiento viscoelástico, lo que significa que sus propiedades mecánicas, como la rigidez, dependen tanto de la temperatura como de la velocidad con la que se le aplica una carga; esta característica influye directamente en cómo responde el material durante y después del proceso de impresión 3D<sup>5</sup>. Daniel Agudelo y colaboradores han mostrado que la impresión 3D usando ABS como materia prima presenta un comportamiento mecánico isotrópico en su parte elástica<sup>6</sup>. Se ha demostrado que el material ABS puede modificar su rigidez dependiendo de las condiciones de uso o del proceso de tratamiento térmico. Un aumento en la temperatura puede debilitar la pieza si no se controla correctamente, pero también puede favorecer la movilidad de las cadenas poliméricas<sup>7</sup>.

Las propiedades mecánicas de una pieza impresa incrementan ajustando los parámetros de impresión, tales como: altura de capa, temperatura de extrusión, velocidad de impresión, patrón de relleno u orientación. Chabaud, *et al.* reportaron que, al disminuir la altura de capa, se reduce la porosidad, lo que se traduce en un incremento de resistencia a la tracción y un considerable aumento de rigidez. Asimismo, se ha identificado que la orientación de impresión tiene un efecto determinante sobre la resistencia mecánica final de las piezas fabricadas. Cuando una carga externa se aplica paralela al crecimiento o apilamiento de las capas, se favorece una mayor resistencia mecánica, ya que se minimiza la propagación de fallas a lo largo de la interfase entre capas impresas. Por el contrario, cuando la carga se aplica perpendicular a la dirección del crecimiento de las capas, se facilita su separación y falla prematura de éstas debido a la débil unión entre las fibras apiladas<sup>8, 9</sup>.

Una estrategia adicional para mejorar las propiedades de piezas impresas en 3D es el tratamiento térmico pos-impresión, principalmente en materiales como PLA, ABS y PETG (Polietileno Tereftalato de Glicol). Este proceso permite eliminar tensiones residuales, incrementar la cohesión entre fibras y reducir la porosidad interna, mejorando de manera significativa las propiedades mecánicas.<sup>10</sup>

Una alternativa para disminuir el cambio dimensional después del tratamiento térmico fue planteada por Lluch-Cerezo y colaboradores, quienes evaluaron el efecto del tratamiento térmico pos-impresión en probetas de ABS utilizando un molde a base de partículas de polvo inerte durante el proceso. Los resultados mostraron mejoras significativas en las propiedades mecánicas, como un aumento del 21 % en la resistencia mecánica, sin que se produjeran deformaciones apreciables en las piezas tratadas. Esto demuestra que, al aplicar calor de forma controlada y con restricción de movimiento, es posible favorecer la cohesión entre capas y reducir la porosidad interna en probetas fabricadas con ABS mediante MDF<sup>11</sup>.

Seok *et al.* demostraron mediante microscopía electrónica de barrido que el tratamiento térmico pos-impresión a 175 °C cierra de manera evidente los poros entre las fibras, lo que mejora significativamente la cohesión entre capas. Esta mejora microestructural se reflejó en un incremento de las propiedades mecánicas, corroborado por ensayos de flexión realizados a las probetas tratadas térmicamente. Estos hallazgos respaldan la efectividad del tratamiento térmico como alternativa para optimizar la base estructural de probetas impresas con ABS al promover la difusión de cadenas poliméricas y reducir la porosidad interna.

El propósito de este trabajo de investigación consiste en analizar el efecto del tratamiento térmico en la resistencia cohesiva entre capas de probetas fabricadas por impresión 3D empleando como materia prima el termoplástico ABS. El procedimiento consistió en fabricar un molde de partículas de polvo metálicas que limitan el cambio dimensional de las probetas durante el tratamiento térmico a diferentes temperaturas y tiempos de proceso. Para evaluar el efecto de la resistencia cohesiva se realizaron pruebas de compresión en la dirección perpendicular al crecimiento o apilamiento de las capas impresas, y medición de dureza Shore D. Además, se emplearon parámetros de impresión optimizados que permitieron la evaluación correcta de la unión entre capas impresas.

<sup>5</sup> Chabaud *et al.*, 2019.

<sup>11</sup> Lluch Cerezo *et al.*, 2021.

<sup>12</sup> Seok *et al.*, 2023.

## Metodología experimental

### Impresión 3D

El filamento de impresión que se usó fue el termoplástico ABS+ de color azul, marca Color Plus, con diámetro de 1.75 mm. Las probetas se fabricaron en una impresora Ender 3 con boquilla de 0.4 mm. Para imprimir con ABS se utilizaron algunos parámetros sugeridos por el programa *Creativity Slicer* 4.8.2 considerando una altura de capa depositada de 0.12 mm y 80% de densidad de relleno<sup>13</sup>. Después de realizar pruebas de compresión preliminares comparativas entre varios patrones de relleno (cúbico, giroide, triangular y lineal), el patrón cúbico presentó una menor tendencia a la delaminación entre capas impresas en comparación con los otros patrones ensayados. Por lo que, el patrón de relleno cúbico fue seleccionado para imprimir las probetas cuadrangulares en esta investigación de acuerdo con los parámetros establecidos en la tabla 1.

La figura 1 muestra la dirección de crecimiento de las capas - dirección *z* (véase detalle de la figura 1a), así como el patrón cúbico de relleno seleccionado para todas las probetas. Las probetas se imprimieron de forma horizontal (plano *xy*). Además, se especificó de pruebas preliminares que el espesor de pared consistiera en una sola capa de 1.2 mm con 50% de superposición de relleno para incrementar la resistencia cohesiva. Por las características físicas del patrón cúbico (véase detalle de la figura 1b), la anisotropía de la impresión 3D disminuye, ya que no hay una dirección de crecimiento preferencial tan evidente, como el que existe para otros patrones de relleno. Sin embargo, esta anisotropía sigue siendo significativa, razón por la cual esta investigación se centra en incrementar la unión entre capas impresas.

Las dimensiones del modelo de impresión para las probetas se basaron de la norma ASTM D695-15 para ensayos de compresión. La geometría de prisma cuadrangular de 12.7 x 12.7 x 25.4 mm fue seleccionada por permitir evaluar la resistencia cohesiva entre capas impresas que han crecido en la dirección transversal *z* de la probeta.

**Tabla 1.** Parámetros de impresión de probetas cuadrangulares.

Parámetros	Valores
Altura de capa	0.12 mm
Ancho de línea de relleno	0.4 mm
Grosor de la pared	1.2 mm
Planchado	Habilitado
Densidad de relleno	80%
Patrón de relleno	Cúbico
Superposición de relleno	50%
Rapidez de impresión	50 relleno y 25 paredes (mm/s)
Temperatura de boquilla	230°C
Temperatura de la placa de impresión	100°C

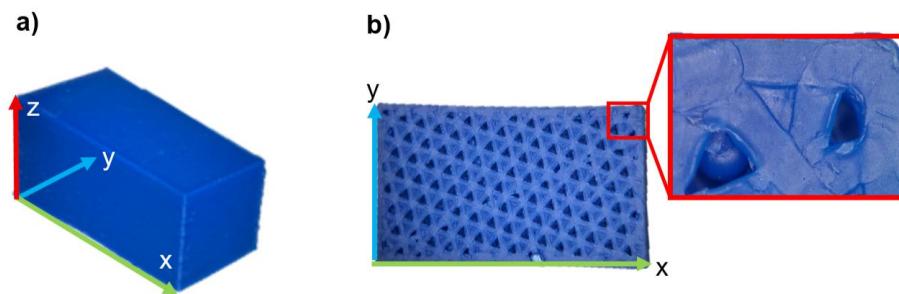


Figura 1. Probeta cuadrangular impresa por MDF. a) Crecimiento de capas en la dirección z, b) Patrón de relleno y superposición de relleno.

### Tratamiento térmico

El tratamiento térmico de las probetas se llevó a cabo a 85, 90 y 95°C, durante períodos de 10, 15 y 20 horas en un horno de resistencias. Las muestras fueron sumergidas en polvo metálico aproximadamente a 50°C, la presión interna del polvo se estima en 25 kPa. Esta presión fue la indicada, ya que causa la menor afectación en las dimensiones de las probetas de acuerdo con pruebas preliminares que se realizaron. Las temperaturas seleccionadas fueron muy cercanas a la temperatura de transición vítrea del termoplástico ABS ( $T_g=106^\circ\text{C}$ )<sup>14</sup>. La geometría de las partículas de polvo metálico fue esférica, esta condición permite que la presión interna del polvo sea lo más homogénea posible, además de restringir el alargamiento de las paredes de las probetas. La figura 2 muestra la morfología de las partículas de polvo metálico, este polvo es una aleación base cobalto 68F-NS-1 de Oerlikon Metco, con tamaño de partícula de -10/+45  $\mu\text{m}$ .

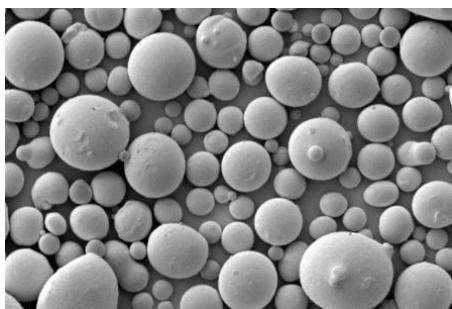


Figura 2. Micrografía del polvo metálico Metco 68F-NS-1<sup>15</sup>.

La figura 3 muestra el arreglo empleado para lograr la presión de 25 kPa; el cual consiste en un recipiente cilíndrico de cristal delgado, en la parte inferior se colocó una cama de polvo metálico conductor de calor. Posteriormente se posicionó la probeta de forma horizontal con la cara xy inferior hacia arriba y se cubrió con polvo metálico hasta alcanzar la misma cantidad de polvo en la parte superior de la probeta (cama superior). La carga se colocó tal y como se observa en la figura 3, de tal manera que hubiera la holgura suficiente para deslizar la carga dentro del recipiente cilíndrico. Una vez preparada la probeta en el molde, se procedió a incrementar la temperatura del horno de resistencias a 1°C/min aproximadamente hasta llegar a la temperatura deseada.

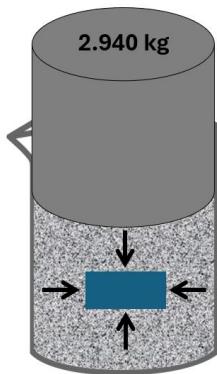


Figura 3. Configuración del molde empleado para realizar el tratamiento térmico.

### Prueba de compresión

Las pruebas de compresión se realizaron en un equipo hidráulico de palanca, modelo GCTS-16, la carga aplicada en la palanca se realizó en intervalos de 10 segundos. Se registraron los valores de fuerza aplicada (kN) y desplazamiento (mm) para cada probeta. A pesar de que la norma ASTM D695-15 recomienda una rapidez de  $1.3 \pm 0.3$  mm/min (aproximadamente 0.0217 mm/s), en este caso se empleó una rapidez de aproximadamente 3 mm/min controlable para el operador. Esta rapidez, aunque superior a la sugerida por la norma ASTM, se mantuvo de manera constante durante las pruebas en los intervalos mencionados, lo que permitió la evaluación de la resistencia a la compresión de las probetas. Con los datos obtenidos, se construyeron gráficas de carga contra deformación para comparar y analizar la resistencia a la compresión de las probetas con y sin tratamiento térmico de acuerdo con las condiciones que se muestran en la tabla 2.

Las muestras se identificaron mediante un código alfanumérico para definir las condiciones de temperatura y tiempo de tratamiento térmico. Se realizó la prueba de dureza Shore D a cada probeta antes y después del tratamiento térmico sobre las caras perpendiculares (caras  $yz$ ) a la dirección de la carga. Asimismo, se registró el cambio en las dimensiones de largo, alto y ancho de cada probeta; quedando registrado como se muestra a continuación:

Tabla 2. Códigos alfanuméricos para la identificación de las probetas.

Código	Condiciones
NT	Sin tratamiento
85T10H	Tratamiento a 85 °C por 10 horas
85T15H	Tratamiento a 85 °C por 15 horas
85T20H	Tratamiento a 85 °C por 20 horas
90T10H	Tratamiento a 90 °C por 10 horas
90T15H	Tratamiento a 90 °C por 15 horas
90T20H	Tratamiento a 90 °C por 20 horas
95T10H	Tratamiento a 95 °C por 10 horas
95T15H	Tratamiento a 95 °C por 15 horas
95T20H	Tratamiento a 95 °C por 20 horas

## Resultados y discusión

### Resistencia cohesiva

La figura 4 muestra el comportamiento mecánico que experimentó la probeta NT después de la prueba de compresión. La principal falla que se observó en la superficie (cara  $xz$ ) es la separación de las capas impresas, presentándose como pequeñas fisuras perpendiculares al plano de deslizamiento que tiene una orientación de  $45^\circ$  con respecto a la línea de acción de la carga compresiva. Una característica de las fallas en estas probetas es la separación pronunciada entre capas impresas cercanas a las paredes (cara  $xy$ ) de las probetas, lo que evidencia una baja resistencia cohesiva. Además, las zonas donde comienzan a nuclear las fisuras en las caras  $xy$  no presentan un estiramiento significativo entre las capas (zonas de color azul claro).

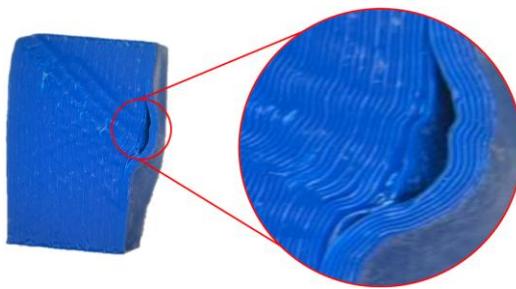


Figura 4. Fisuras en la probeta NT (sin tratamiento térmico) sometida a compresión.

Las probetas que fueron sometidas a temperaturas de  $85^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $95^\circ\text{C}$  por 10, 15 y 20 horas, respectivamente, presentaron de manera general una disminución en la delaminación y un cambio dimensional en las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$ . La figura 5 muestra el modo de falla por cizallamiento que se presenta en las caras  $xz$  de las probetas justo cuando se presentó la falla eminentemente que ocasionó la pérdida de carga. Este resultado evidencia que, al incrementar la temperatura, la delaminación disminuye por efecto del incremento en la interacción de las cadenas poliméricas en la interfase de las fibras que forman las capas, principalmente. Cabe destacar que, el inicio de falla evidente para las probetas que fueron tratadas a  $95^\circ\text{C}$  no se presentó en las caras  $xz$ , en este caso, se presentó en la cara superior  $xy$  (véase la figura 6), evidenciando el incremento de la resistencia cohesiva entre las capas. La falla en la cara superior  $xy$  puede atribuirse a que es una capa en la superficie de la probeta que no posee la superposición de relleno. Sin embargo, la capa de superficie  $xy$  inferior no presentó este tipo de falla debido que es una capa que durante toda la impresión se mantuvo a  $100^\circ\text{C}$ , condición térmica que incrementa la interacción de las cadenas poliméricas entre las fibras que conforman las primeras capas.

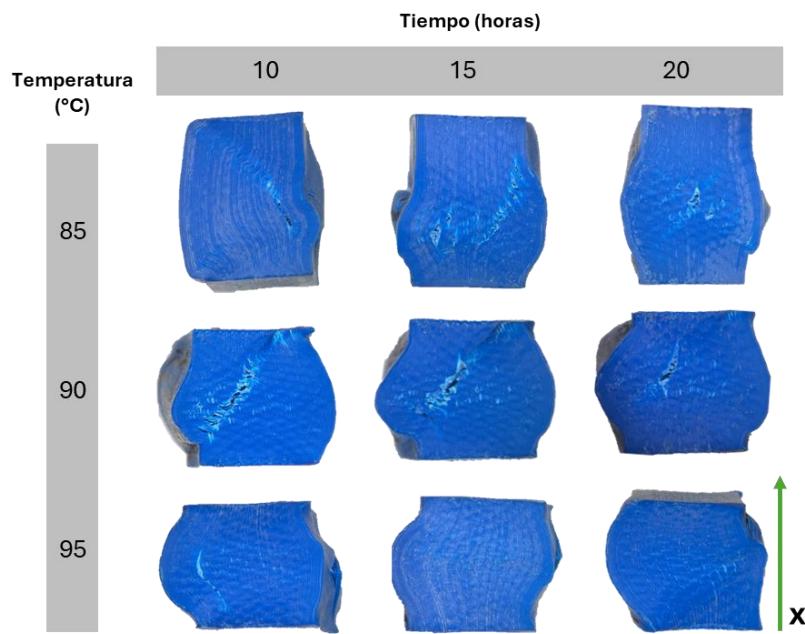


Figura 5. Fisuras observadas en las caras  $xz$  de las probetas ensayadas a compresión después del tratamiento térmico a diferentes temperaturas y tiempos de exposición.

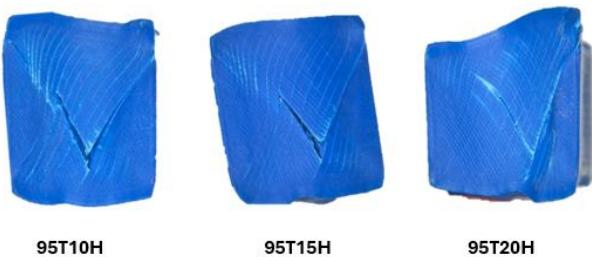


Figura 6. Fisura presentada en la cara  $xy$  superior de las probetas ensayadas a compresión después del tratamiento térmico a  $95^{\circ}\text{C}$  a diferentes tiempos de exposición.

Los polímeros usados para impresión 3D se caracterizan por cambiar notablemente sus dimensiones cuando son sometidos a temperaturas cercanas a su temperatura de transición vítrea. En este sentido, la condición de compresión de las probetas en el tratamiento térmico propuesto en esta investigación permitió que el cambio dimensional de éstas fuera mucho menor al reportado en la literatura<sup>11,16</sup>. La presión de 25 kPa que ejercieron las partículas de polvo metálico sobre las caras de las probetas impresas permitió que la mayoría de las dimensiones en las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$  presentaran una reducción. En la figura 7 se puede observar el cambio dimensional para las probetas que fueron sometidas a tratamiento térmico de acuerdo con las condiciones de la tabla 2. La dirección  $z$  es la dirección que menos cambio experimentó, y puede deberse al apilamiento de las capas impresas, es decir, al tratar de contraerse existe menos espacio entre capas. Caso contrario a lo que sucede en las direcciones  $x$  y  $y$ , la contracción es más significativa, ya que se tiene más espacio (poros y cavidades del relleno) para el reacomodo de las fibras impresas, lo que tiende a disminuir la porosidad y cavidades. El mayor porcentaje de deformación tanto en la dirección  $x$  como en  $y$  lo presenta la probeta que estuvo a  $95^{\circ}\text{C}$  por 10 horas, siendo  $-5.39\%$  y  $-4.41\%$ , respectivamente. La reducción de dimensiones para las probetas que están próximas a la temperatura de transición vítrea ( $90$  y  $95^{\circ}\text{C}$ ) pueden atribuirse a la zona de transición plástica, ya que, en esta zona, el polímero pierde resistencia y tiende a fluir por la carga compresiva. Por lo que, se esperaría que la interacción de las cadenas poliméricas incremente.

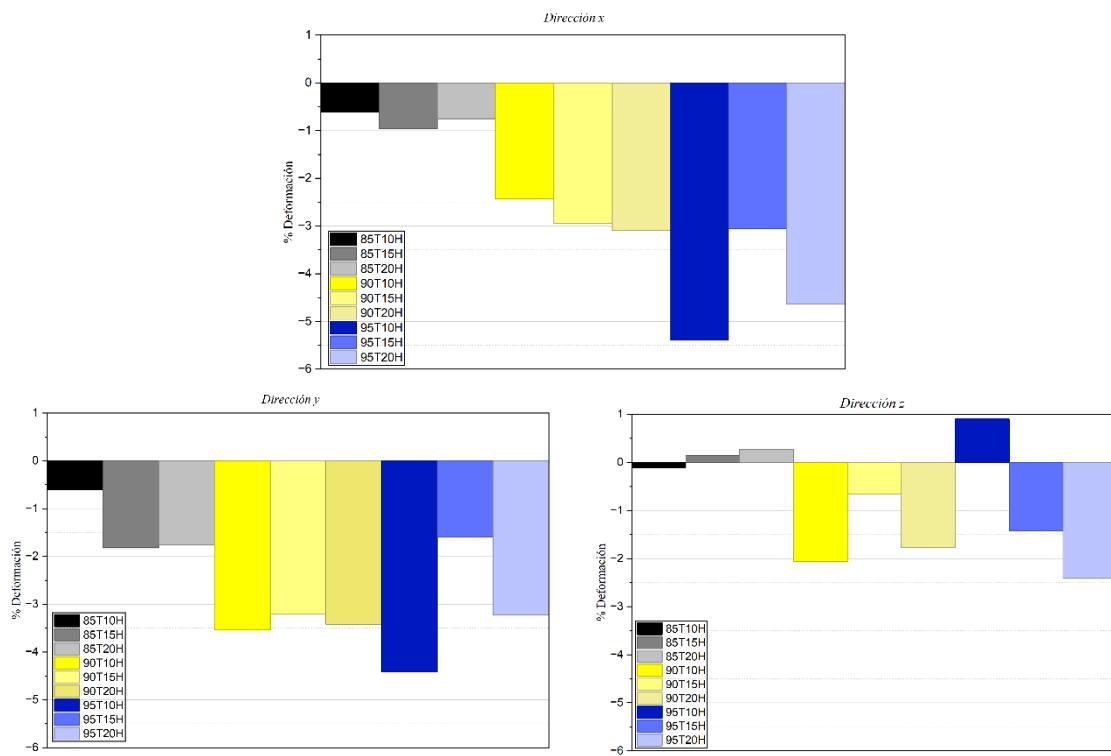


Figura 7. Porcentaje de deformación después de la prueba de compresión en las direcciones x, y y z.

Las curvas carga-deformación de la figura 8 corresponden a las pruebas de compresión que se realizaron; las curvas se encuentran ordenadas de acuerdo con la temperatura del tratamiento térmico. La primera zona de las curvas muestra un comportamiento lineal ascendente (zona elástica) hasta aproximadamente 3.5 y 4.0 kN, seguida de una zona de transición para continuar con un comportamiento lineal horizontal que caracteriza el modo de falla. Para las probetas que fueron tratadas a 85°C, las curvas de la figura 8a muestran que al incrementar la deformación en la zona plástica de aproximadamente -1.5 mm a -6.5 mm, la carga permanece constante, siendo menor para la probeta NT que no fue tratada térmicamente. Para la probeta NT es de esperarse que la falla se presente a menor deformación por poseer una menor resistencia cohesiva. Para las probetas tratadas a 90 y 95°C, la carga promedio que soportaron en la zona plástica fue de 5 y 5.5 kN, respectivamente, en el mismo intervalo de deformación antes mencionado. Las pruebas de compresión fueron llevadas hasta que la carga descendiera repentinamente debido a la delaminación entre las capas impresas. Sin embargo, las probetas tratadas a 95°C no presentaron una disminución repentina de la carga a pesar de que la fisura se presentó en la cara xy superior de cada probeta, inclusive, la carga en la zona plástica alcanzó valores de 7.5 a 8 kN. Este efecto se le atribuye al cambio de modo de falla logrado por el tratamiento térmico, debido a esta condición de temperatura, las probetas tienden a seguir comprimiéndose en lugar de fallar por cizallamiento como se evidencia en la figura 5.

El efecto del tiempo de tratamiento térmico se muestra en las curvas carga-deformación de la figura 9, están ordenadas de acuerdo con el tiempo de proceso. Se puede observar que, para la probeta tratada a 85°C, al incrementar el tiempo de permanencia de 10 hasta 20 horas, la carga aplicada en la parte lineal de la curva incrementa progresivamente hasta llegar a 4.5 kN, manteniéndose alrededor de 5 kN desde 1.5 hasta 6 mm de deformación por compresión. Este efecto cambia para las probetas que fueron tratadas a 90 y 95°C, ya que, desde las 10 horas de tratamiento térmico, la carga estable que alcanzaron fue muy próxima a los 5 kN. Para ambas probetas, la deformación por compresión se extendió hasta 11 mm, este comportamiento puede atribuirse al cambio que sufrió la interfase de las fibras que forman las capas impresas, éstas presentaron mayor resistencia a la deformación plástica. Es claro que, al acercarse a la temperatura de transición vítreo del termoplástico ABS, la interacción entre las cadenas poliméricas incrementa, este efecto también depende del tiempo de tratamiento térmico para temperaturas no tan próximas pero cercanas a la temperatura de transición vítreo del polímero. Cabe mencionar que este efecto también está relacionado con la compresión ejercida por las partículas de polvo metálico sobre las probetas impresas durante el tratamiento térmico.

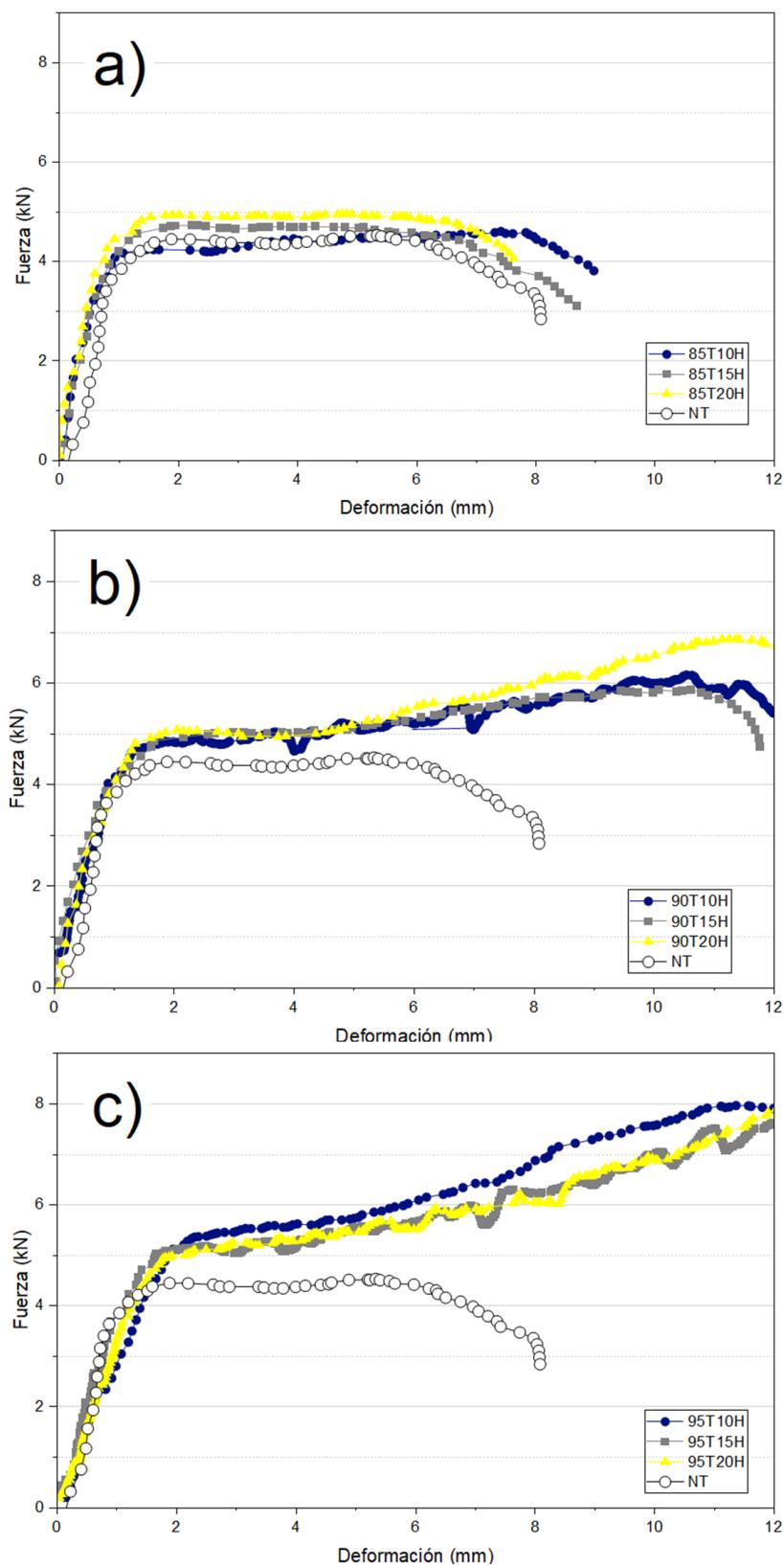


Figura 8. Curvas carga-deformación agrupadas a diferentes temperaturas de tratamiento térmico.

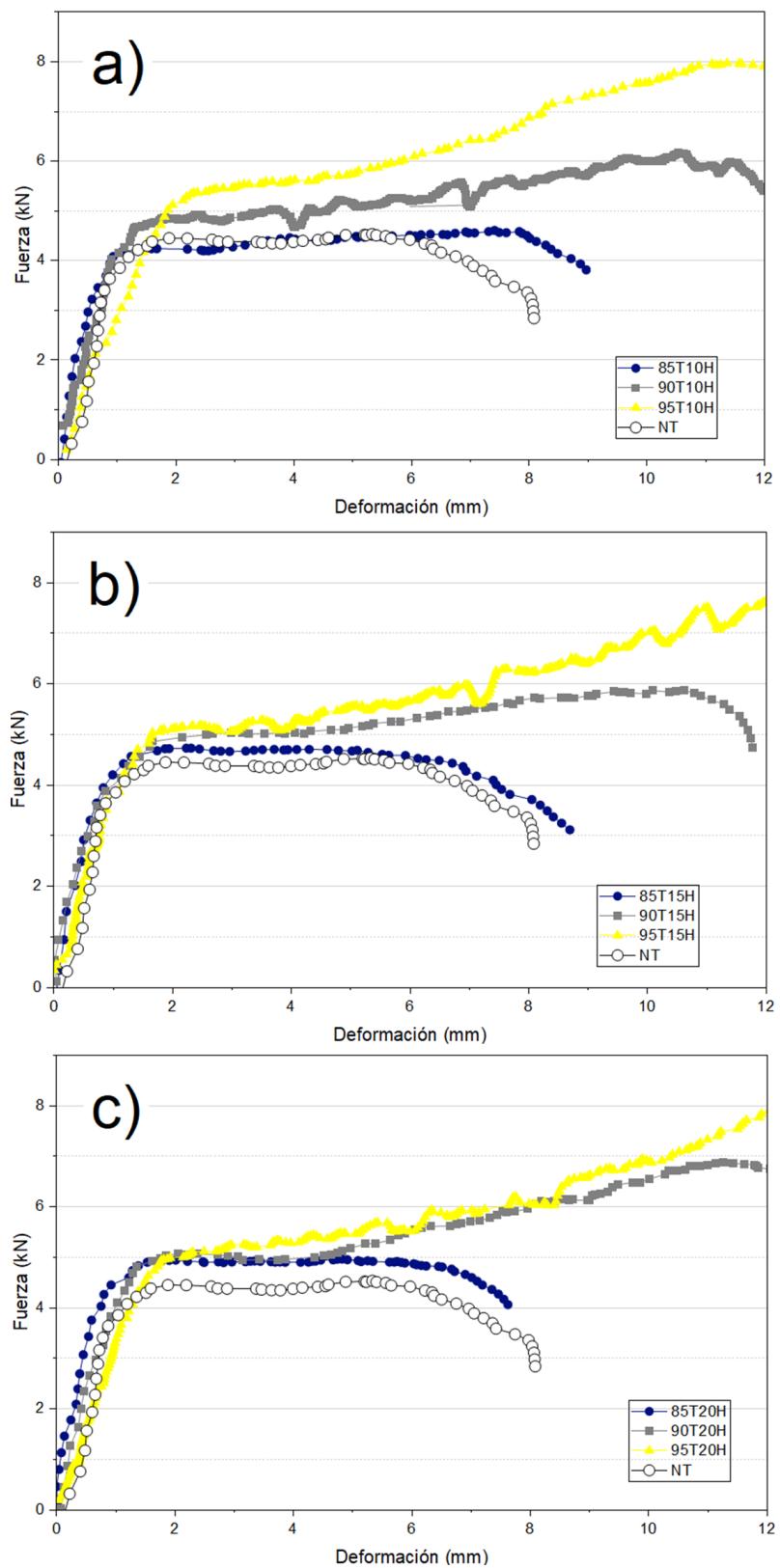


Figura 9. Curvas carga-deformación agrupadas a diferentes tiempos de tratamiento térmico.

## Dureza Shore D de las probetas

La dureza Shore D de las probetas impresas es una propiedad mecánica que puede ayudar en la evaluación de la resistencia cohesiva entre las capas. Para el termoplástico ABS, los valores de dureza en la escala Shore D suelen estar entre 75 y 80, y se relacionan directamente con la densidad y cohesión del material<sup>17</sup>. Una condición que se debe cumplir para medir la dureza Shore D es asegurar que las superficies medidas sean planas y paralelas, de acuerdo con la norma ASTM D2240. Esta condición de planicidad no se cumple para las probetas tratadas térmicamente en esta investigación, ya que presentan superficies cóncavas debidas a la relajación de esfuerzos y disminución de porosidad del interior de la capa impresa (véase la figura 10). Esta relajación es evidente en las caras  $xz$  y  $yz$  de las probetas, siendo la cara  $yz$  la superficie cuadrada en la cual la carga se aplicó en la prueba de compresión.

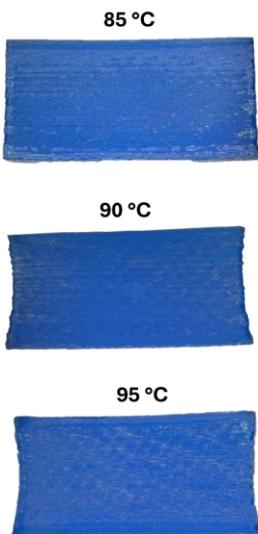


Figura 10. Concavidad resultante en las caras  $xz$  y  $yz$  de las probetas después del tratamiento térmico.

La figura 11 muestra el comportamiento de la dureza de las probetas antes y después del tratamiento térmico. La dureza fue medida antes del tratamiento térmico en las caras  $yz$ , éstas se desbastaron ligeramente para asegurar la planicidad que establece la norma ASTM D2240. Como se mencionó anteriormente, las caras que están formadas por las capas de impresión mostraron superficies cóncavas después del tratamiento térmico (véase figura 10), motivo por el cual la medición de dureza no fue confiable. Las zonas en las que se pudo medir la dureza fue en las caras  $yz$  de las probetas después de la prueba de compresión, ya que estas caras presentaron planicidad. Sin embargo, debido a la prueba de compresión es de esperarse que las caras  $yz$  incrementen su densidad, incrementando con esto la dureza esperada. Las probetas que mostraron un cambio significativo en la dureza fueron las probetas tratadas a 85°C, este resultado está relacionado más con la rigidez alcanzada por el polímero ABS debido al tratamiento térmico y no al incremento de la resistencia cohesiva entre las capas impresas, ya que la resistencia a la compresión fue muy similar a las probetas tratadas a 90° y 95°C (véase la figura 8a). Este incremento de rigidez está relacionado con el modo de falla por cizallamiento que se muestra en la figura 5. La dureza de la mayoría de las probetas tratadas a 90° y 95°C presentaron una ligera disminución, a pesar de que la cara evaluada es una zona que incrementó su densidad debido a la compresión que experimentó la probeta (véase la figura 7). Este comportamiento puede atribuirse al debilitamiento causado por el estiramiento del material ABS durante la deformación plástica por compresión que experimentó.

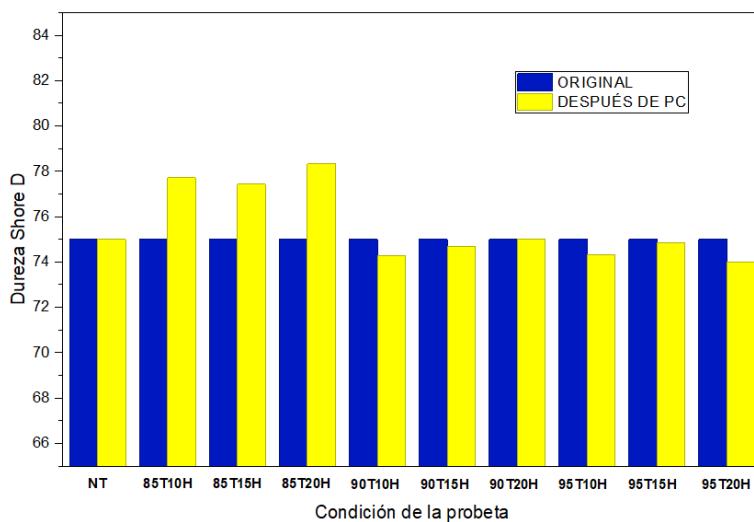


Figura 11. Valores de dureza Shore D de las muestras antes del tratamiento térmico y posterior a prueba de compresión (PC).

## Conclusiones

Los resultados de las pruebas mecánicas confirman que los tratamientos térmicos incrementan la resistencia mecánica de las piezas impresas en 3D de material ABS, siempre que se apliquen las condiciones óptimas de tiempo, temperatura y control dimensional; un exceso de éstas puede generar deformaciones significativas o pérdida de propiedades mecánicas.

La carga máxima que experimentaron las probetas hasta el inicio de la deformación plástica evidenció el incremento de la resistencia cohesiva entre capas impresas (relación con la parte elástica), siendo la carga de aproximadamente 4.5 kN para la probeta sin tratamiento térmico (NT) y hasta 5.0 kN para la mayoría de las probetas con tratamiento térmico. Además, la carga máxima para la falla evidente se presentó a valores próximos a 8 kN para la probeta 95T10H con una deformación cercana a los 12 mm. Esta deformación es 1/3 parte más grande que la deformación experimentada por la probeta sin tratamiento térmico.

La condición del tratamiento a 90°C durante 20 horas (90T20H) destacó por alcanzar una resistencia a la compresión de 6.55 kN antes de la falla, con cambios dimensionales de -3.09 % en x, -1.77 % en y y -3.42 % en z, siendo ésta la combinación más equilibrada entre resistencia mecánica y estabilidad dimensional. El uso de un molde con partículas metálicas a presión permitió restringir eficazmente la expansión de las probetas durante el tratamiento térmico, mientras que la presión de 25 kPa favoreció la interacción entre cadenas poliméricas, reduciendo la delaminación y promoviendo un modo de falla más dúctil.

## Agradecimientos

Los/as autores agradecen el apoyo brindado durante el desarrollo de este trabajo a Miguel Ángel Herrera Bermúdez por su apoyo en las pruebas de compresión y a la Universidad de Guanajuato por las becas otorgadas a los estudiantes.

## Bibliografía/Referencias

- [1] Cano Vicent, A., Tambuwala, M. M., Hassan, S. S., Barh, D., Aljabali, A. A. A., Birkett, M., Arjunan, A., & Serrano Aroca, Á. (2021). Fused deposition modelling: Current status, methodology, applications and future prospects. *Additive Manufacturing*, 47, 102378. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102378>
- [2] Ortiz Gil, A. (2019). Las impresoras 3D como herramientas científicas. *Encuentros Multidisciplinarios*, 21(61), 41-48. <https://repositorio.uam.es/handle/10486/687514>
- [3] Vishwakarma, S. K. (2017). Characterization of ABS material: A review. *International Journal of Advanced Research in Science and Engineering*, 6(5), 340-343. <https://www.irjet.net/archives/V6/I5/IRJET-V6I502.pdf>

- [4] Rodríguez, J. F., Thomas, J. P., & Renaud, J. E. (2003). Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene fused-deposition materials. *Rapid Prototyping Journal*, 9(3), 162-170. <http://dx.doi.org/10.1108/13552540310489604>
- [5] Chabaud, G., Castro, M., Denoual, C., & Lacrampe, M. F. (2019). Investigation of the effect of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of ABS parts produced by FDM. *Rapid Prototyping Journal*, 25(4), 672-680. <https://doi.org/10.1108/RPJ-12-2017-0275>
- [6] Agudelo, D., Díaz, D., Ibarra, A., Cruel, C., Montoya, M., & Hernández, C. (2019). Caracterización mecánica a tensión de impresiones 3D de PLA y ABS modeladas por deposición fundida. Desarrollo e innovación en ingeniería (pp. 497-507). Corporación Instituto Antioqueño de Investigación. [https://www.researchgate.net/publication/335973217\\_Caracterizacion\\_mecanica\\_a\\_tension\\_de\\_impresiones\\_3D\\_de\\_PLA\\_y\\_ABS\\_modeladas\\_por\\_deposicion\\_fundida](https://www.researchgate.net/publication/335973217_Caracterizacion_mecanica_a_tension_de_impresiones_3D_de_PLA_y_ABS_modeladas_por_deposicion_fundida)
- [7] Vattathurvalappil, S. H., Hassan, S. F., & Haq, M. (2023). Mechanics of ABS polymer under low & intermediate strain rates. *Recent Progress in Materials*, 5(1). <https://doi.org/10.21926/rpm.2301012>
- [8] Rajkumar, P., & Singh, R. (2021). Effect of infill pattern and orientation on mechanical behavior of FDM printed ABS parts. *Materials Today: Proceedings*, 46, 6941-6946. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.05692>
- [9] Rentería Baltíerrez, F. Y., Puente Córdova, J. G., Loera Martínez, P. I., & Aguilar Villarreal, A. Y. (2025). Efecto de los parámetros de impresión 3D en la resistencia mecánica del ABS. *Ingenierías*, 28(98), 31-41. <https://doi.org/10.29105/ingenierias28.98-968>
- [10] Hussam, H., Soliman, M. S., Hassab Allah, I. M., & Abdelrhman, Y. (2025). Effect of annealing on FDM-manufactured ABS parts. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 138, 2233-2243. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-025-15455-5>
- [11] Lluch Cerezo, J., Benavente, R., Meseguer, M. D., & García Manrique, J. A. (2021). Effect of a powder mould in the post-process thermal treatment of ABS parts manufactured with FDM technology. *Polymers*, 13(15), 2422. <https://doi.org/10.3390/polym13152422>
- [12] Seok, W., Jeon, E., & Kim, Y. (2023). Effects of annealing for strength enhancement of FDM 3D-printed ABS reinforced with recycled carbon fiber. *Polymers (Basel)*, 15(14), 3110. <https://doi.org/10.3390/polym15143110>
- [13] Shenzhen Creality 3D Technology Co., Ltd. (2022). Creality Slicer (Versión 4.8.2) [Software]. <https://www.creality.com>
- [14] San Andrés, M., Chécoles, R., Navarro, E., de la Roja, J. M., Gorostiza, J., Higueras, M., & Blanch, E. (2023). Use of 3D printing PLA and ABS materials for fine art. *Analysis of composition and long-term behaviour of raw filament and printed parts. Journal of Cultural Heritage*, 59, 181-189. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207422002187>
- [15] Oerlikon Metco. (2023). Metco 68F-NS-1, Thermal Spray Powder. myMetco. <https://mymetco.oerlikon.com/en-us/product/metco68fns1>
- [16] Hussam, H., Soliman, M. S., Hassab Allah, I. M., & Abdelrhman, Y. (2025). Efecto annealing on FDM-manufactured ABS parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 138(5-6), 2233-2243. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15455-5>
- [17] ASTM International. (2021). ASTM D2240-15 (2021): Standard test method for rubber property-durometer hardness. ASTM International. <https://www.astm.org/d2240-15r21.html>