Naturaleza y TECNOLOGÍA
Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE NANOCOMPÓSITOS COMPATIBLES CON LA IMPRESIÓN 3D: COMPOSITOS DE NANOTUBOS DE CARBONO EN ESTEREOLITOGRAFÍA

Jesús Eduardo Rodríguez Moreno, Xochitl Mondragón Pineda, Viridiana Porras Méndez, Andrea Carolina Andrade Ponce, Miriam Irán López Aguirre, Saul Alejandro Aguilar Maruri, Julián Cabrera Ruiz *, Rosalba Fuentes Ramírez

Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Noria Alta S/N, Guanajuato, Guanajuato, 36050, México.

j.cabreraruiz@ugto.mx

Resumen

La impresión 3D mediante estereolitografía (SLA, por sus siglas en inglés) ofrece alta precisión para fabricar estructuras complejas, pero su anisotropía limita su desempeño; por ello la incorporación de nanomateriales en resinas comerciales constituye una estrategia prometedora para mejorar sus propiedades funcionales. En este trabajo se desarrollaron nanocompósitos utilizando las resinas fotopolimerizables Craftsman de procesamiento digital de luz (DLP, por sus siglas en inglés) y Tough 2.0 de ANYCUBIC®, modificadas con nanotubos de carbono (NTC) prístinos (NTCP) y carboxilados (NTCC) a diferentes concentraciones (0.007 %, 0.015 %, 0.030 % y 0.060 % peso/peso); estos fueron homogeneizados mediante ultrasonido y procesados mediante impresión 3D por fotopolimerización SLA. La caracterización mecánica se realizó mediante ensayos de tensión complementados con pruebas de dureza; esto permitió evaluar el efecto de la concentración de NTC y la posición de impresión sobre la resistencia mecánica de los nanocompósitos. Se encontró que la resina DLP Craftsman exhibió una mayor rigidez, registrando un módulo elástico de 16.00 MPa al doparse con NTCC al 0.007 % en posición vertical; por su parte, la resina Tough respondió de manera más pronunciada al nano-refuerzo, logrando un pico global de tenacidad de 1921.53 MJ/m^3 con NTCC al 0.030 % en posición vertical y la mayor dureza de 62.3 ShD (unidades Shore) al incorporar NTCP al 0.030 % en posición horizontal. Asimismo, las propiedades electroquímicas fueron evaluadas mediante espectroscopía de impedancia electroquímica, utilizando diagramas de Nyquist (los cuales representan la parte imaginaria frente a la real de la impedancia para evaluar la oposición al paso de corriente y el transporte de carga); lo anterior para determinar el comportamiento conductor de las formulaciones. Se observó que el sistema con mayor capacidad de transferencia de carga y menor resistencia global alcanzó valores en el rango mínimo de ohmios (destacando la resina Tough con NTCC al 0.007 % y la resina DLP Craftsman con NTCP al 0.007 %). Las propiedades mecánicas alcanzadas mediante impresión 3D por SLA, junto con la incorporación de NTC, representan un avance clave para la

obtención de componentes multifuncionales con propiedades mecánicas y eléctricas mejoradas, ampliando su potencial en aplicaciones de electrónica avanzada, sensores, electrodos y dispositivos energéticos.

Palabras clave: Impresión 3D; nanotubos de carbono; resinas SLA; compósitos; anisotropía.

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF NANOCOMPOSITES COMPATIBLE WITH 3D PRINTING

Abstract

Stereolithography (SLA) 3D printing offers high precision in fabricating complex structures, but its anisotropy limits its performance; therefore, incorporating nanomaterials into commercial resins is a promising strategy to improve their functional properties. In this work, nanocomposites were developed using the photopolymerizable resins Craftsman Digital Light Processing (DLP) and Tough 2.0 from ANYCUBIC®, modified with carbon nanotubes (CNTs), pristine (p-CNTs) or carboxylated (c-CNTs) at different concentrations (0.007 %, 0.015 %, 0.030 %, and 0.060 % w/w), which were homogenized by ultrasound and processed by SLA photopolymerization 3D printing. Mechanical characterization was performed using tensile tests complemented by hardness tests, allowing the evaluation of the effect of CNT concentration and print position on the mechanical resistance of the nanocomposites. The Craftsman DLP resin exhibited greater stiffness, registering an elastic modulus of 16.00 MPa when doped with 0.007 % c-CNTs in a vertical position. The Tough resin responded more pronouncedly to the nanoreinforcement, achieving an overall peak toughness of 1921.53 MJ/m^3 with c-CNTs at 0.030 % in a vertical position and the highest hardness of 62.3 ShD when incorporating p-CNTs at 0.030 % in a horizontal position. Likewise, the electrochemical properties were evaluated by electrochemical impedance spectroscopy, using Nyquist diagrams (which plot the imaginary component against the real component of impedance to evaluate electrical resistance and charge transfer) to determine the conductive behavior of the formulations, where the system with the highest charge transfer capacity and lowest overall resistance reached values in the minimum range of ohms, highlighting the Tough resin with c-CNTs at 0.007 % and the DLP Craftsman resin with p-CNTs at 0.007 %. The mechanical properties achieved through SLA 3D printing, along with the incorporation of CNTs, represent a key advance in obtaining multifunctional components with improved mechanical and electrical properties, expanding their potential in advanced electronics applications, sensors, electrodes, and energy devices.

Keywords: 3D printing; carbon nanotubes; SLA resins; composites; anisotropy.

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

1. Introducción

En años recientes, la impresión 3D ha encontrado aplicaciones en numerosas áreas de investigación. Entre ellas destacan la catálisis, la electrónica, la industria aeroespacial y la ingeniería de tejidos, debido a las múltiples ventajas que esta tecnología ofrece. Los principales beneficios son la posibilidad de crear diseños complejos con gran libertad, la personalización de los productos y la reducción del desperdicio de materiales durante el proceso de fabricación (Clarissa y col., 2022).

De acuerdo con el principio utilizado en la formación de estructuras, la impresión 3D engloba diversas técnicas. Éstas incluyen la extrusión de material, la inyección de aglutinantes, la deposición de material, la deposición de energía dirigida, la laminación de capas, la fusión en lecho de polvo y la fotopolimerización en cuba (Li y col., 2023).

Cada uno de estos métodos presenta características particulares, así como ventajas y limitaciones que determinan su uso en diferentes aplicaciones. La selección de una tecnología de impresión específica depende, en general, de diversos factores. Entre éstos destacan el tipo de material que se empleará, la rapidez del proceso de fabricación, el nivel de resolución requerido, los costos asociados y las propiedades de desempeño esperadas en el producto final (Li y col., 2023).

La fabricación aditiva ha experimentado una evolución significativa. Ha pasado de la simple creación de prototipos geométricos a la manufactura de componentes funcionales (Clarissa y col., 2022). Inicialmente, la impresión 3D basada en la deposición fundida (FDM, por sus siglas en inglés) permitió incorporar diversos nanocompósitos en matrices poliméricas, como el ácido poliláctico (PLA, por sus siglas en inglés). Estudios recientes, como los realizados por Alli y col., (2023) y Li y col., (2023) han demostrado que la adición de nanopartículas metálicas, cerámicas o basadas en carbono es fundamental para superar las limitaciones intrínsecas de los polímeros base. Esto mejora notablemente sus propiedades mecánicas y térmicas, así como su conductividad eléctrica (Alli y col., 2023; Li y col., 2023).

Estos avances en FDM establecieron las bases para el uso de aditivos a nanoescala como agentes moduladores de propiedades funcionales (Li y col., 2023). Por propiedades funcionales se entiende la capacidad del compuesto para responder a estímulos

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

externos, como los eléctricos, magnéticos o mecánicos.

La demanda industrial de mayor resolución, acabado superficial superior y control microestructural ha impulsado el interés por la fotopolimerización en cuba (Vat Polymerization o SLA, *Stereolithography* en inglés) (Li y col., 2023). A diferencia del proceso de extrusión, la SLA utiliza resinas fotosensibles que se solidifican selectivamente mediante luz ultravioleta (UV) o láser (Clarissa y col., 2022). Sin embargo, el propio proceso de curado capa por capa genera una marcada anisotropía mecánica. De acuerdo con Sardana y col., (2026) la formación de la interfaz entre capas, la orientación de construcción y la colocación de soportes son factores que influyen directamente en la distribución de defectos y en la respuesta estructural de la pieza final.

Para superar estas limitaciones se ha explorado la adición de nano-refuerzos (partículas con una dimensión menor a 100 nanómetros, como los nanotubos de carbono, grafeno, sílice coloidal o nanopartículas metálicas) en matrices fotosensibles. Estudios previos han evaluado específicamente el efecto de la adición de nanotubos de carbono (NTC) en diversas matrices poliméricas, entre ellas, resinas fotosensibles como las usadas en SLA. Por ejemplo, Guo y col. (2024) y Kuribayashi y col. (2026) evaluaron concentraciones entre 0.05 % y 0.5 % en peso; ellos reportan que, mientras que concentraciones bajas pueden incrementar el módulo elástico, concentraciones elevadas inducen a pérdidas drásticas en la resistencia a la tensión de hasta de 67.86 %, lo que sugiere evaluar intervalos aún menores de concentración de nano-refuerzos.

A pesar del potencial de la SLA, el desarrollo de materiales compuestos sigue enfrentando obstáculos técnicos críticos, tales como la alta viscosidad de las resinas cargadas, la contracción volumétrica durante el curado y la necesidad de compatibilizar la química de la resina con la naturaleza física de los nano-refuerzos (Li y col., 2023).

En este contexto, el presente trabajo se centra en el desarrollo y evaluación de nuevos sistemas de nanocompuestos diseñados específicamente para el proceso de SLA. Este estudio busca cerrar la brecha existente entre la formulación química de resinas híbridas y la optimización de los parámetros de impresión. De este modo, se permite la creación de estructuras que no sólo mantengan la integridad estructural (tales

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

como la resistencia mecánica y la dureza de forma isotrópica), sino que también incorporen funcionalidades avanzadas, como la conductividad eléctrica, superando las limitaciones de los materiales base convencionales utilizados actualmente.

2. Metodología

2.1. Materiales

Como matriz polimérica se emplearon dos resinas fotopolimerizables comerciales utilizadas en impresión 3D basada en la tecnología SLA: Tough 2.0 y DLP Craftsman, ambas del fabricante ANYCUBIC®.

Como fase de nano-refuerzo se utilizó NTC multipared en dos variantes: nanotubos prístinos (NTCP) (CheapTubes Inc., diámetro externo de 20-30 nm, longitud de 10-30 µm y pureza del 95 %) y nanotubos funcionalizados con grupos carboxílicos (NTCC) (Akersunder™, diámetro externo de 3-15 nm, longitud de 15-30 µm y pureza del 90 %).

2.2. Formulación de nanocompósitos

Para facilitar la manipulación de los NTC se prepararon concentrados iniciales para cada combinación de resina y NTC, empleando una relación másica de NTC en resina de 1:6. Los componentes se mezclaron por molienda en un mortero de ágata durante 15 min, hasta obtener una pasta homogénea. Los concentrados se almacenaron en tubos de polipropileno, protegidos de la luz solar, para evitar la polimerización prematura.

A partir de los concentrados se prepararon diluciones con concentraciones finales de 0.007 %, 0.015 %, 0.030 % y 0.060 % en peso; asimismo, se emplearon las resinas comerciales sin modificar como blancos. La masa de concentrado incorporada en cada formulación se calculó en función de la concentración final de NTC deseada, hasta alcanzar una masa total de 220 g. Esta cantidad asegura que la bandeja de impresión cuente con suficiente material para completar la impresión.

Finalmente, las formulaciones fueron sometidas a un proceso de dispersión mediante baño ultrasónico con el equipo Ultrasonic Cleaner Vevor®. Este proceso se operó a una frecuencia de 40 kHz y una potencia de 60 W durante 60 min. El objetivo fue promover una distribución homogénea de los NTC en la matriz polimérica y minimizar la formación de aglomerados, que podrían

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

interferir en el proceso de impresión o en las propiedades finales de los nanocompósitos.

2.3. Diseño e impresión de probetas

Las probetas para los ensayos mecánicos fueron diseñadas en un programa CAD, siguiendo las especificaciones establecidas en la norma ISO-527-2:2012 para ensayos de tensión en materiales plásticos. La geometría y dimensiones de las probetas empleadas se muestran en la Figura 1.

La fabricación de las probetas se realizó en una impresora 3D ANYCUBIC Photon Mono M7 Pro®, utilizando el software de laminado Photon Workshop®. Los parámetros de impresión definidos se detallan en la Tabla 1.

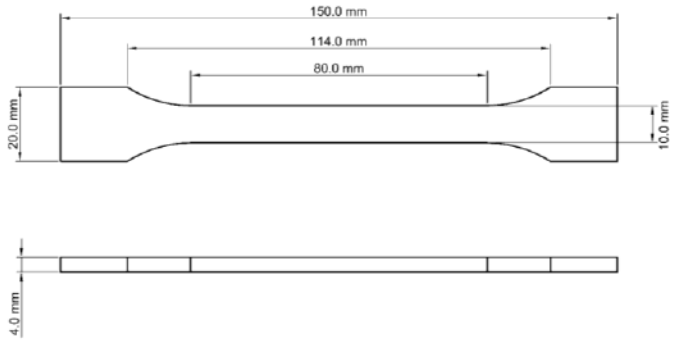


Figura 1. Dimensiones en milímetros de las probetas fabricadas.

Tabla 1. Parámetros de impresión empleados en la impresión 3D, según el tipo de resina comercial.

Parámetro	Tough 2.0	DLP Craftsman
Espesor de capa [mm]	0.050	0.050
Tiempo de exposición normal [s]	1.8	1.8
Tiempo de apagado [s]	0.0	0.5
Espera antes de elevación [s]	0.0	0.0
Espera después de elevación [s]	0.0	0.0
Número de capas base	5	5
Tiempo de exposición de capas base [s]	30	40
Tiempo de apagado de capas base [s]	30	30
Espera antes de elevación de capas base [s]	0.0	0.0
Espera después de elevación de capas base [s]	0.0	0.0

Se imprimieron las probetas en dos orientaciones respecto a la plataforma de impresión (Figura 2). Para cada combinación (tipo de resina, tipo de NTC, concentración de NTC y orientación) se imprimieron tres réplicas.

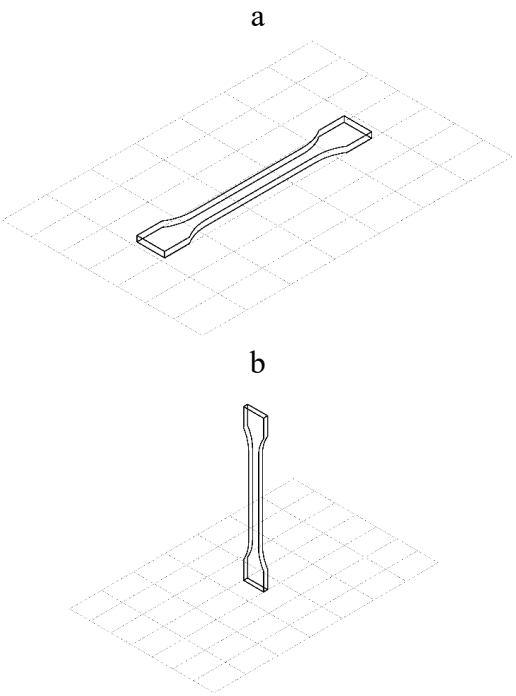


Figura 2. Orientaciones empleadas en la fabricación de las probetas: a) horizontal (0°), orientación 1 b) vertical (90°), orientación 2, respecto a la plataforma de impresión.

2.4. Postratamiento de probetas

Al finalizar el proceso de impresión, las probetas fueron sometidas a un lavado mediante inmersión en alcohol isopropílico al 99.9 % para eliminar el exceso de resina no polimerizada adherida a su superficie. Finalmente, se llevó a cabo un postcurado en una estación ANYCUBIC Wash & Cure Max 3.0®, aplicando luz UV durante 5 min a cada cara de cada probeta. Este procedimiento se realizó con el fin de mejorar la estabilidad de las piezas y asegurar condiciones homogéneas previas a su caracterización.

2.5. Pruebas mecánicas

Se realizaron ensayos de tensión en una máquina universal de ensayos Shimadzu Autograph AGS-J®, equipada con una celda de carga de 10 kN; asimismo, los datos de carga y desplazamiento fueron registrados mediante el software Trapezium X®.

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

La caracterización de las muestras se complementó con ensayos de dureza mediante un durómetro digital Shore A/D (probador de dureza para plásticos). Para asegurar la representatividad de los datos, se registraron cuatro mediciones por probeta.

2.6. Caracterización electroquímica

El comportamiento electroquímico de los materiales se evaluó mediante espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS, por sus siglas en inglés), utilizando un potenciostato-galvanostato Gamry Interface 1000T®. Las mediciones se llevaron a cabo en una celda electroquímica estándar de tres electrodos: un electrodo de trabajo correspondiente al nanocompósito a evaluar, un contraelectrodo de platino (Pt) y un electrodo de referencia de mercurio/óxido de mercurio (Hg/HgO). Para los electrodos de trabajo se emplearon placas rectangulares con dimensiones 1 cm × 2 cm, las cuales fueron extraídas de los soportes generados en la impresión de las probetas. Cada electrodo fue parcialmente sumergido en el electrolito, una solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) 0.1 M, de modo que su área electroactiva geométrica efectiva fuese de 1 cm^2.

Se realizaron mediciones de impedancia en el rango de frecuencias de 0.1 Hz a 2 kHz, con una amplitud de 5 mV y un potencial de polarización de 0.2 V. Los resultados experimentales se representaron mediante diagramas de Nyquist.

2.7. Análisis estadístico

Todos los ensayos se realizaron por triplicado para cada condición experimental. Para determinar las propiedades mecánicas, los datos de carga y desplazamiento obtenidos de las tres réplicas se procesaron para generar una curva esfuerzo-deformación promedio representativa de cada formulación. Los valores reportados corresponden a dichas curvas promedio, a excepción del esfuerzo máximo, el cual se expresa como la media aritmética ± la desviación estándar (DE).

En los ensayos de dureza Shore A/D se realizaron cuatro mediciones en cada probeta (una en cada esquina). Los resultados se representaron como la dureza promedio en función de la posición y la orientación de impresión, junto con sus respectivas DE.

Para determinar si las diferencias observadas en las propiedades de las distintas orientaciones de impresión son estadísticamente significativas, se implementó la prueba t-Welch (Ecuación 1).

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \qquad \text{Ec. 1}$$

Donde:

- $\bar{X}_1$, $\bar{X}_2$ son las medias muestrales de los esfuerzos máximos registrados.
- S_1, S_2 son las desviaciones estándar.
- n_1, n_2 son los tamaños de réplica

Los grados de libertad requeridos para dicha prueba se estimaron mediante la ecuación de Welch-Satterthwaite (Ecuación 2).

$$\nu = \frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1}\right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{S_2^2}{n_2}\right)^2}{n_2 - 1}} \qquad \text{Ec. 2}$$

Se estableció un nivel de significancia del 95 % ($\alpha = 0.05$), considerando las diferencias como estadísticamente significativas cuando el valor p obtenido fue menor que 0.05.

Para la caracterización electroquímica, la respuesta del sistema se evaluó mediante el análisis de la magnitud de la impedancia en los diagramas de Nyquist representativos de cada condición. El procesamiento numérico de los datos y la elaboración de los gráficos se realizaron mediante software especializado de análisis de datos.

3. Resultados

3.1. Pruebas de tensión

Los resultados de las pruebas de tensión se presentan en la Tabla 2**.**

Tabla 2. Tabla de propiedades mecánicas

Resina	Proporción NTC			σ_{max} (MPa)	DE (±)	σ_u (MPa)	E* (MPa)	$\varepsilon_{0.2\%}$* (%)	U_r* $\left(\frac{MJ}{m^3}\right)$	U_t* $\left(\frac{MJ}{m^3}\right)$
Resina Tough	Blancos		1	26.22	1.58	24.09	5.30	1.08	0.11	982.87
			2	38.16	0.81	34.91	7.39	2.87	0.10	1614.66
	Prístinos	0.007	1	26.87	0.54	24.47	6.42	1.56	0.09	499.92
			2	42.57	1.52	36.92	9.55	2.12	0.13	967.48
		0.015	1	30.02	1.62	26.93	7.04	1.69	0.13	589.56
			2	42.22	1.20	40.73	9.89	1.95	0.12	967.76
		0.030	1	21.95	0.96	20.36	4.93	1.21	0.09	792.53

			2	50.99	0.61	50.50	11.48	1.06	0.08	493.75
		0.060	1	16.99	0.15	16.36	3.66	0.94	0.07	629.80
			2	41.87	0.73	41.96	10.25	1.68	0.09	196.84
	Carboxilados	0.007	1	28.00	0.59	25.74	6.84	1.53	0.10	480.12
			2	44.59	0.65	40.58	10.78	1.73	0.11	1111.98
		0.015	1	27.64	0.49	24.03	6.86	1.21	0.10	782.74
			2	42.22	1.20	32.91	9.86	2.33	0.13	1265.94
		0.030	1	26.20	0.92	20.78	6.53	1.44	0.09	780.39
			2	41.69	0.82	35.88	8.95	1.80	0.11	1921.53
		0.060	1	31.03	0.11	24.41	6.74	1.45	0.12	438.67
			2	43.53	1.35	43.32	9.58	1.88	0.09	388.17
	Blancos		1	37.34	0.12	37.87	9.38	1.14	0.11	171.85
			2	57.60	0.44	57.63	13.35	1.13	0.12	261.85
	Prístinos	0.007	1	48.96	1.99	48.70	12.32	1.67	0.15	253.81
			2	54.79	0.10	60.56	15.19	2.54	0.13	242.05
		0.015	1	44.14	3.45	44.14	11.57	1.97	0.06	171.57
			2	61.81	2.92	56.67	14.90	2.56	0.11	223.91
		0.030	1	45.82	0.08	45.82	10.45	1.26	0.09	204.47
			2	63.12	1.42	63.12	12.67	2.17	0.12	280.51
		0.060	1	40.71	1.23	36.47	10.45	1.48	0.10	137.85
			2	58.11	3.41	55.69	15.27	0.90	0.04	133.96
Resina DLP Craftsman	Carboxilados	0.007	1	44.98	2.52	44.48	11.29	2.36	0.05	190.06
			2	64.76	2.75	58.85	16.00	2.84	0.04	153.73
		0.015	1	45.62	2.00	43.66	11.63	3.14	0.08	282.87
			2	61.19	2.74	58.85	15.88	2.66	0.03	153.72
		0.030	1	42.04	0.28	41.24	10.32	2.59	0.15	318.85
			2	59.72	4.22	53.75	14.97	2.16	0.10	152.51
		0.060	1	46.07	0.58	47.19	11.39	1.82	0.11	203.84
			2	43.59	0.90	44.90	15.35	1.67	0.14	77.56

σ_{max}: resistencia máxima la tensión/esfuerzo máximo de tensión (MPa); **DE:** desviación estándar (±); **σ_u:** resistencia última de tensión/esfuerzo último de tensión (MPa); **E**: módulo de Elasticidad o Módulo de Young (MPa); **$\varepsilon_{0.2\%}$**: deformación al límite elástico convencional al 0.2% (%); **U_r**: módulo de resiliencia (MJ/m^3); **U_t**: tenacidad a la fractura / tenacidad total (MJ/m^3); **1**: orientación de impresión horizontal; **2**: orientación de impresión vertical. Los valores indicados con (*) corresponden a una sola medición de la curva promedio y por tanto no presentan DE.

El comportamiento de la resina Tough evidencia claramente el impacto de la orientación de impresión (Figura 3). En orientación vertical, la resina sin dopar alcanzó un esfuerzo máximo de 38.16 ± 0.81 MPa, un módulo de elasticidad de 7.39 MPa y una tenacidad de 1614.66 MJ/m^3 (+45.5 % en esfuerzo, +39.4 % en rigidez y +64.3 % en tenacidad frente a la orientación horizontal).

Al incorporar NTCP al 0.007 %, el esfuerzo vertical aumentó a 42.57 ± 1.52 MPa (+11.6 % respecto al blanco vertical) con un módulo de 9.55 MPa. Al 0.015 % en orientación vertical, el esfuerzo alcanzó 42.22 ± 1.20 MPa (+10.6 %) y subió el módulo a 9.89 MPa (+33.8 %).

El punto óptimo para NTCP se logró al 0.030 % en orientación vertical, alcanzando el máximo de esfuerzo con 50.99 ± 0.61 MPa (+33.6 % frente al blanco vertical) y un módulo de 11.48 MPa (+55.3 %); en orientación horizontal, el esfuerzo cayó a 21.95 ± 0.96 MPa (-16.3 %) y el módulo a 4.93 MPa (-7.0 %).

Finalmente, al 0.060 %, las propiedades se degradaron: la orientación horizontal cayó a un esfuerzo de 16.99 ± 0.15 MPa (-35.2 %), un módulo mínimo de 3.66 MPa (-30.9 %), mientras que la orientación vertical redujo su tenacidad un 87.8 % (196.84 MJ/m³).

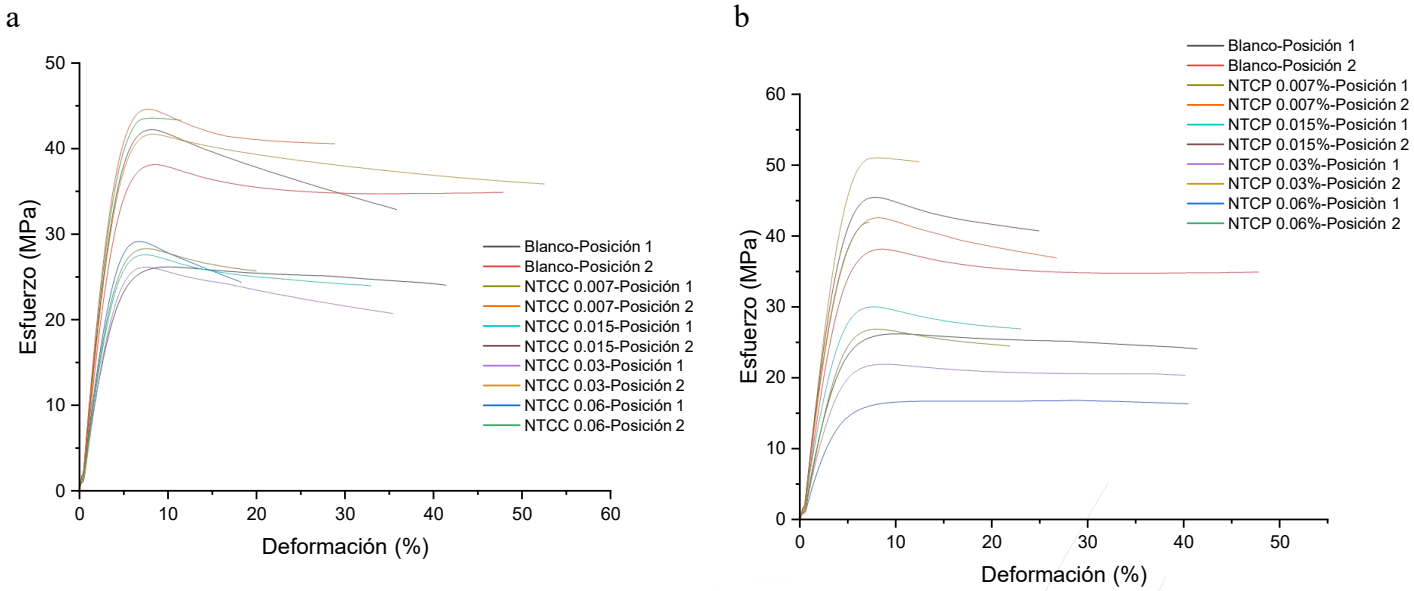


Figura 3. Propiedades Mecánicas bajo Ensayo de Tensión para la resina Tough; Blanco y, NTCP (a) y NTCC (b) al 0.007 %, 0.015 %, 0.030 % y 0.060 %

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

La caída observada al 0.060 % es un fenómeno análogo al deterioro drástico registrado por Moudam y col. (2013) al pasar de 0.1 % a 0.15 % en matrices epóxicas.

Para la resina Tough dopada con NTCC (Figura 3), la adición a 0.007 % en orientación vertical supera a los prístinos con un esfuerzo máximo de 44.59 ± 0.65 MPa (+16.9 % respecto al blanco vertical), un módulo de elasticidad de 10.78 MPa (+45.9 %) y una tenacidad de 1111.98 MJ/m³.

Al 0.015 % en orientación vertical, la tenacidad sube a 1265.94 MJ/m³ (+13.8 % respecto al 0.007 %), alcanzando 42.22 ± 1.20 MPa de esfuerzo y 9.86 MPa de módulo.

El punto óptimo de tenacidad para la resina Tough en orientación vertical se alcanza al 0.030 %, registrando un máximo absoluto de 1921.53 MJ/m³ (+19.0 % respecto al blanco vertical y +289.2 % frente a NTCP a igual dosis), con 41.69 ± 0.82 MPa de esfuerzo y 8.95 MPa de módulo.

Finalmente, al 0.060 %, la tenacidad vertical cae a 388.17 MJ/m³, aunque la rigidez se conserva mejor que con los prístinos, alcanzando 43.53 ± 1.35 MPa y 9.58 MPa en orientación vertical, e 31.03 ± 0.11 MPa y 6.74 MPa en orientación horizontal.

La resina DLP Craftsman blanca es más rígida que Tough (Figura 4). Su material base en orientación horizontal presenta un esfuerzo máximo de 37.34 ± 0.12 MPa y un módulo de elasticidad de 9.38 MPa. En orientación vertical, alcanza un esfuerzo de 57.60 ± 0.44 MPa (+54.3 %) y un módulo de 13.35 MPa (+42.3 %), demostrando la superioridad de la impresión vertical.

Con NTCP en la resina DLP Craftsman, la adición a 0.007 % eleva el módulo en orientación horizontal a 12.32 MPa (+31.3 % respecto al blanco horizontal) con un esfuerzo de 48.96 ± 1.99 MPa, y en orientación vertical a 15.19 MPa (+13.8 %) con 54.79 ± 0.10 MPa.

Al 0.015 %, la orientación vertical mantiene un módulo elevado de 14.90 MPa (+11.6 %) y un esfuerzo de 61.81 ± 2.92 MPa.

Por otro lado, el dopaje del 0.030 % en orientación vertical genera un esfuerzo de 63.12 ± 1.42 MPa (+9.6 % respecto al blanco vertical), un módulo de 12.67 MPa y una tenacidad de 280.51 MJ/m³.

Finalmente, al 0.060 %, la tenacidad vertical disminuye un 48.8 % (133.96 MJ/m³), registrando 58.11 ± 3.41 MPa de esfuerzo y 15.27 MPa de módulo.

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

Con NTCC en la resina DLP Craftsman, la dosis de 0.007 % logra la condición más rígida de toda la investigación, alcanzando un pico en orientación vertical con un módulo de 16.00 MPa (+19.8 % respecto al blanco vertical) y un esfuerzo máximo de 64.76 ± 2.75 MPa (+12.4 %), en contraste la orientación horizontal con 11.29 MPa (+20.4 %) y 44.98 ± 2.52 MPa.

Al 0.015 %, la orientación vertical mantiene un módulo elevado de 15.88 MPa (+19.0 %) con un esfuerzo de 61.19 ± 2.74 MPa, mientras que la orientación horizontal alcanza una tenacidad de 282.87 MJ/m³ (+64.6 % respecto al blanco horizontal) y 45.62 ± 2.00 MPa de esfuerzo.

Al 0.030 %, la orientación horizontal registra el pico de tenacidad para este sistema con 318.85 MJ/m³ (+85.5 %), alcanzando 42.04 ± 0.28 MPa de esfuerzo y 10.32 MPa de módulo.

Por último, al 0.060 %, el material sufre el colapso más severo en tenacidad, cayendo en orientación vertical a 77.56 MJ/m³ (-70.4 %) y un esfuerzo de 43.59 ± 0.90 MPa, a pesar de conservar un módulo de 15.35 MPa.

Al comparar las orientaciones de impresión, la orientación vertical resulta superior a la orientación horizontal al ofrecer incrementos de entre 15 % y 50 %. En cuanto al nano-refuerzo, los NTCC superan a los NTCP al lograr picos de rigidez y tenacidad sin caídas abruptas a concentraciones bajas. Para aplicaciones de máxima rigidez, la mejor condición es la resina DLP Craftsman al 0.007 % NTCC en orientación vertical, mientras que para absorción de energía destaca la resina Tough al 0.030 % NTCC en orientación vertical. En todas las formulaciones, la concentración de 0.060 % debe descartarse por sobrepasar el límite de dispersión efectiva.

Estos resultados demuestran que la incorporación de NTC constituye una estrategia eficaz para mitigar la anisotropía mecánica inherente a la impresión 3D por SLA, reduciendo la disparidad de propiedades entre orientaciones.

Este efecto homogeneizador fue más acentuado con los NTCC, los cuales favorecieron una distribución uniforme de esfuerzos. Dicho beneficio se maximiza en el intervalo de 0.007 % a 0.030 %.

Kuribayashi y col., (2026) reportan un decaimiento de 67.86% en la resistencia máxima a la tensión al incorporar NTC al 0.5 % en peso, fenómeno que atribuyen a la

aglomeración del nano-refuerzo y a la atenuación del curado UV. Esta tendencia se confirmó al analizar los datos obtenidos en el límite superior evaluado, es decir, a 0.060 %, donde la resina Tough 2.0 con NTCP horizontal decayó un −35.20 % en la resistencia máxima a la tensión.

A diferencia del deterioro generalizado descrito por Kuribayashi y col., (2026), en esta investigación se lograron incrementos mecánicos notables tanto en la concentración máxima como en concentraciones bajas. A la concentración límite (0.060 %), la sinergia entre los NTCC y la orientación de impresión horizontal mitigó la falla por aglomeración, alcanzando incrementos de hasta +23.38% en la resina DLP Craftsman y +18.34% en la resina Tough 2.0. Por su parte, los mejores resultados se obtuvieron con los NTCC impresos en posición vertical. Para la resina DLP Craftsman, el óptimo fue de 0.007 % de

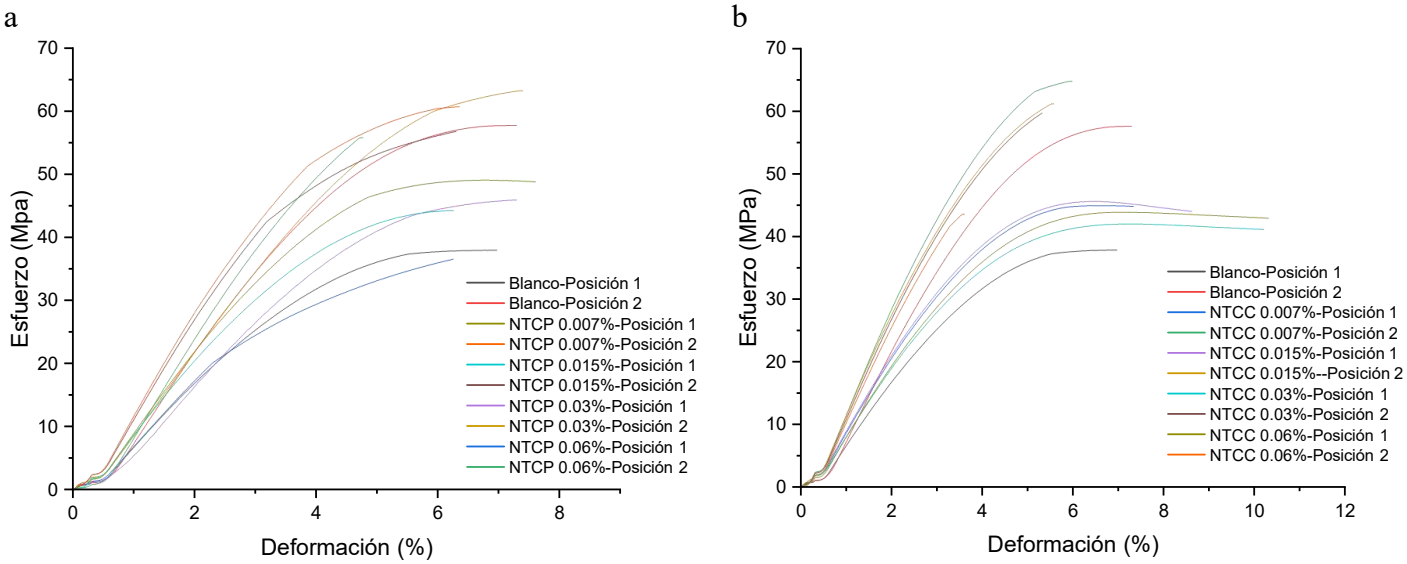


Figura 4. Propiedades Mecánicas bajo Ensayo de Tensión de la DLP Crasftman; Blanco y, NTCP (a) y NTCC (b) al 0.007 %, 0.015 %, 0.030 % y 0.060 %

NTCC. Esta formulación alcanzó un módulo elástico de 16.00 MPa, lo que representa un aumento del 19.85 % respecto a la resina pura. Para la resina Tough, la mejor concentración fue de 0.030 % de NTCC. Esta mezcla alcanzó una tenacidad de 1921.53 MJ/m³, lo que representa un aumento del 19.00 % respecto al blanco. A concentraciones equivalentes, el NTCC superó al NTCP en desempeño.

La mayor ventaja se observó en la resina Tough, con un 0.030 %, superando la tenacidad del NTCP en un 289.20 %.

Al realizar el análisis de costo por probeta, se obtuvo que la formulación de DLP Craftsman con 0.007 % de NTCC presentó un costo aproximado de $12.47 (MXN) por probeta, mientras que la probeta elaborada con resina DLP Craftsman sin modificar tuvo un costo de aproximadamente $12.46 (MXN), lo que representa únicamente un incremento de 0.04 % en el costo de materia prima. Para la resina Tough con 0.030 % de NTCC, el costo fue de aproximadamente $13.76 (MXN) por probeta, en comparación con $13.74 (MXN) por probeta para la resina sin modificar, equivalente a un incremento de aproximadamente 0.15 %. A pesar de las diferencias significativas en los costos unitarios de los NTCC ($440/100 g) respecto a los NTCP ($365/100 g), su incorporación en bajas concentraciones genera un incremento mínimo en el costo de fabricación, mientras que permite obtener mejoras significativas.

3.2. Prueba t-Welch para ensayos de tensión

Al evaluar el efecto de la orientación de impresión en las pruebas de tensión mediante la prueba *t* de Welch, se obtuvieron valores menores al valor de significancia $p < 0.05$ en la totalidad de los pares comparados, siendo $p = 0.037$ el caso más conservador, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. *Prueba t-Welch* para los esfuerzos máximos a la tensión.

Resina	Proporción NTC		Posición	σ_{max} (MPa)	DE (±)	*t*	*ν*	*ν**	Valor *p*
Resina Tough	Blancos		1	26.22	1.58	-0.037	3.544	4	0.00136
			2	38.16	0.81				
	Prístinos	0.007	1	26.87	0.54	-0.034	3.375	3	0.00350
			2	42.57	1.52				
		0.015	1	30.02	1.62	-0.033	3.611	4	0.00047
			2	42.22	1.2				
		0.03	1	21.95	0.96	-0.031	2.717	3	0.00003
			2	50.99	0.61				
		0.06	1	16.99	0.15	-0.038	2.641	3	0.00030
			2	41.87	0.73				
	Carboxilados	0.007	1	28	0.59	-0.033	3.365	3	0.00001
			2	44.59	0.65				
		0.015	1	27.64	0.49	-0.034	3.448	3	0.00030
			2	42.22	1.2				
		0.03	1	26.2	0.92	-0.035	3.367	3	0.00003

			2	41.69	0.82			
		0.06	1	31.03	0.11	-0.032	3.615	4	0.00389
			2	43.53	1.35			
	Blancos		1	37.34	0.12	-0.025	3.429	3	0.00017
			2	57.6	0.44			
	Prístinos	0.007	1	48.96	1.99	-0.024	3.950	4	0.03680
			2	54.79	0.1			
		0.015	1	44.14	3.45	-0.023	3.619	4	0.00248
			2	61.81	2.92			
		0.03	1	45.82	0.08	-0.022	3.650	4	0.00225
			2	63.12	1.42			
Resina DLP Craftsman		0.06	1	40.71	1.23	-0.024	3.582	4	0.00365
			2	58.11	3.41			
	Carboxilados	0.007	1	44.98	2.52	-0.022	3.565	4	0.00078
			2	64.76	2.75			
		0.015	1	45.62	2	-0.023	3.699	4	0.00136
			2	61.19	2.74			
		0.03	1	42.04	0.28	-0.024	3.591	4	0.01855
			2	59.72	4.22			
		0.06	1	46.07	0.58	-0.027	3.988	4	0.02779
			2	43.59	0.9			

σ_{max}: resistencia máxima a la tensión/esfuerzo máximo (MPa); **DE:** desviación estándar (±); **t:** t de Welch determinada con Ecuación 1; ν**:** Grados de libertad estimados con Ecuación 2.; ν^***:** Valor de grados de libertad redondeados al entero inmediato; **Valor** p**:** Indicador probabilístico **1**: orientación de impresión horizontal; **2**: orientación de impresión vertical.

Este resultado estadístico confirma con un nivel de confianza del 95 % que el efecto en la orientación de impresión, es decir, la variación en la resistencia máxima a la tensión entre las posiciones horizontal y vertical, es estadísticamente significativa.

3.3. Pruebas de dureza

En las pruebas de dureza, la resina Tough (Figura 5) registra una dureza de 52.5 en orientación horizontal y una dureza de 56.8 en orientación vertical (+8.2 %).

La adición de NTCP a la resina Tough incrementa la dureza en orientación horizontal al 0.007 % (dureza de 58.3, +11.0 % respecto al blanco) y al 0.015 % (dureza de 58.5, +11.4 %), alcanzando el máximo del grupo al 0.030 % con dureza de 62.3 (+18.7 %), para luego caer bruscamente al 0.060 % a una dureza de 53.5 (+1.9 %).

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

En orientación vertical, el dopaje de 0.007 % registra el mínimo de la serie con dureza de 54.2 (-4.6 % frente al blanco). Por tanto, la formulación al 0.030 % de NTCP en orientación horizontal resulta la condición más efectiva para el incremento de dureza en esta serie.

En orientación horizontal, la adición de NTCC (Figura 5) incrementa la dureza progresivamente desde el 0.007 % (dureza de 54.5, +3.8 %) hasta alcanzar el máximo del grupo al 0.030 % (dureza de 61.2, +16.6 %), antes de decaer levemente al 0.060 % (dureza de 59.5, +13.3 %). En orientación vertical, el dopaje de 0.007 % genera el mínimo de la serie con dureza de 52.2 (-8.1 % respecto al blanco).

La propiedad se recupera a concentraciones superiores, alcanzando su pico al 0.030 % con 59.0 MPa (+3.9 %) y estabilizándose al 0.060 % con 57.0 (+0.4 %). En consecuencia, la dosis del 0.030 % de NTCC en orientación horizontal constituye la condición óptima para maximizar la resistencia a la indentación en este sistema.

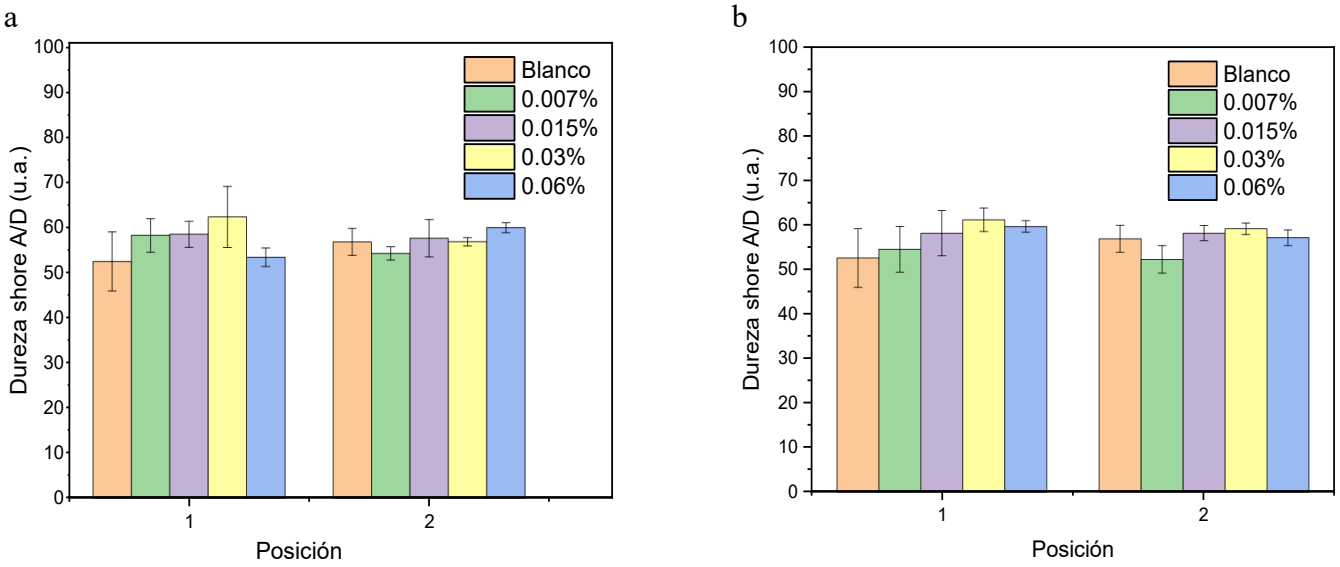


Figura 5. Propiedades Mecánicas Bajo Ensayo de Dureza de la Tough; Blanco y, NTCP (a) y NTCC (b) al 0.007 %, 0.015 %, 0.030 % y 0.060 %

La resina DLP Craftsman sin dopar (Figura 6) registra una dureza de 57.5 en orientación horizontal y de 59.8 en orientación vertical (+4.0 %).

Para el sistema con NTCP (Figura 6) en orientación horizontal, la adición del nano-refuerzo disminuye la dureza al 0.007 % (dureza de 54.2, -5.7 %, el mínimo de la serie)

y al 0.015 % (dureza de 54.6, -5.0 %), recuperándose levemente en su máximo relativo al 0.030 % (dureza de 57.1, -0.7 %) antes de volver a descender al 0.060 % (dureza de 55.5, -3.5 %). En orientación vertical, el dopaje conserva valores elevados y cercanos a la resina base: la dosis del 0.007 % registra el pico del grupo con una dureza de 59.5 (-0.5 % respecto al blanco), mientras que al 0.015 % cae a una dureza de 56.8 (-5.0 %), recupera estabilidad al 0.030 % (dureza de 58.1, -2.8 %) y desciende en su punto final al 0.060 % (dureza de 56.3, -5.9 %). En general, la incorporación de NTCP en esta matriz tiende a reducir ligeramente la dureza respecto al material sin dopar en ambas orientaciones.

Por otro lado, la incorporación de NTCC (Figura 6) en orientación horizontal alcanza su máximo al 0.007 % (dureza de 59.5, +3.5 % respecto al blanco), registrando posteriormente una leve caída al 0.015 % (dureza de 55.7, -3.1 %) para luego estabilizarse al 0.030 % (dureza de 56.6, -1.6 %) y al 0.060 % (dureza de 57.0, -0.9 %). En orientación vertical, el sistema mantiene una dureza elevada y constante: alcanza sus valores máximos al 0.007 % (dureza de 60.0, +0.3 %) y al 0.015 % (dureza de 59.9, +0.2 %), sufriendo un descenso al 0.030 % (dureza de 56.5, -5.5 %, el mínimo de la serie) y recuperándose al 0.060 % (dureza de 59.3, -0.8 %).

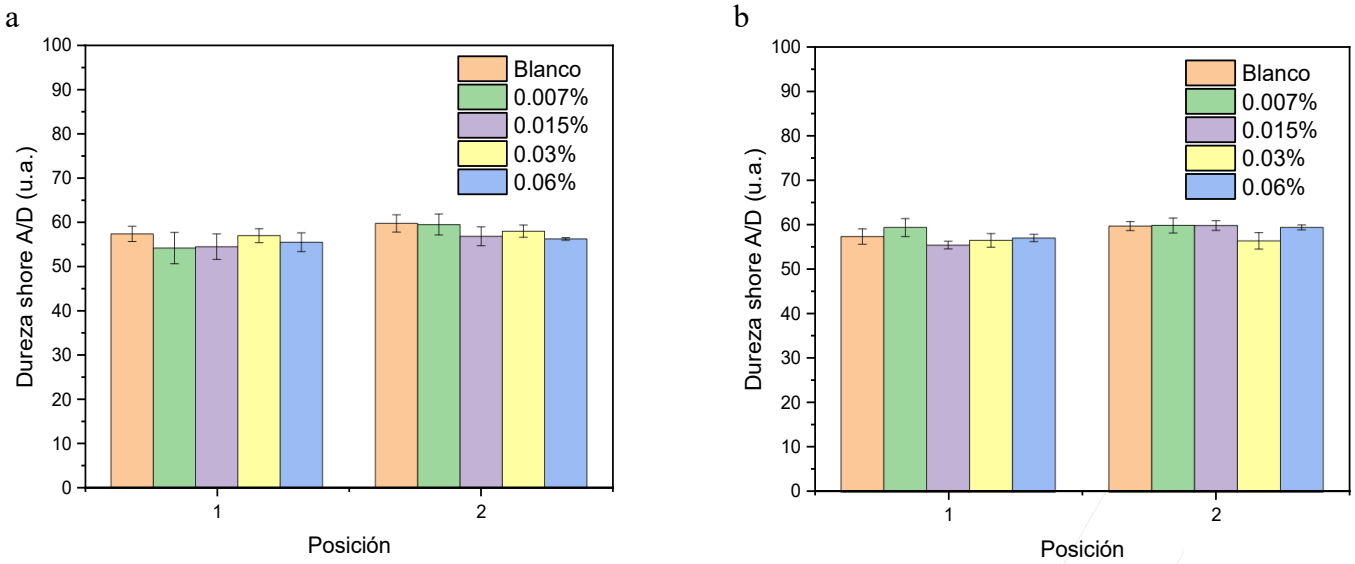


Figura 6. Propiedades Mecánicas Bajo Ensayo de Dureza de la DLP Crasftman; Blanco y, NTCP (a) y NTCC (b) al 0.007 %, 0.015 %, 0.030 % y 0.060 %

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

En consecuencia, la formulación al 0.007 % de NTCC resulta la condición más favorable para preservar y maximizar la dureza en la matriz DLP Craftsman en ambas orientaciones de impresión.

Al comparar ambos nano-refuerzos y resinas, la impresión en orientación vertical otorga de manera uniforme una mayor dureza base en ambas resinas. En la matriz Tough, la adición de NTC eleva considerablemente la resistencia respecto al blanco, destacando el NTCP al 0.030 % en orientación horizontal como el pico absoluto del estudio, seguido del NTCC al 0.030 % en orientación horizontal. Por el contrario, la resina DLP Craftsman presenta una dureza intrínseca alta que no mejora de forma sustancial con el dopaje, registrando su máximo al 0.007 % NTCC en orientación vertical y sufriendo leves caídas con NTCP. En conclusión, el nano-refuerzo maximiza la dureza en la resina Tough, mientras que en la DLP Craftsman conviene mantener dosis mínimas o el blanco.

El mejor desempeño mecánico de las probetas impresas en orientación vertical se explica por una combinación de factores físicos y del propio proceso de impresión. En primer lugar, el constante movimiento de la plataforma de la impresora genera un flujo en la resina que alinea de forma natural los NTC a lo largo de la pieza; de esta manera, cuando se aplica la fuerza de tensión, los nanotubos están perfectamente orientados para soportar la carga en conjunto.

En segundo lugar, al imprimir en esta posición, la luz solidifica áreas transversales muy pequeñas en cada capa, lo que reduce el encogimiento del material al curarse y evita que se generen tensiones internas que debiliten la estructura. Finalmente, como la pieza vertical requiere imprimir muchas más capas, la luz UV alcanza repetidamente a las capas inferiores ya formadas; este curado adicional refuerza fuertemente los enlaces entre las capas, resultando en un material mucho más sólido y resistente.

3.4. Análisis electroquímico

Al analizar la respuesta electroquímica de las matrices poliméricas en estado puro, la resina Tough presenta un comportamiento marcadamente capacitivo y de alta resistencia. Esto se evidencia en su diagrama de Nyquist (Figura 7) por la presencia de un arco semicircular amplio y definido de alta impedancia, cuyo ápice se ubica en la zona intermedia de frecuencias sobre el eje real, lo cual confirma el alto valor de impedancia del fotopolímero sin dopar.

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

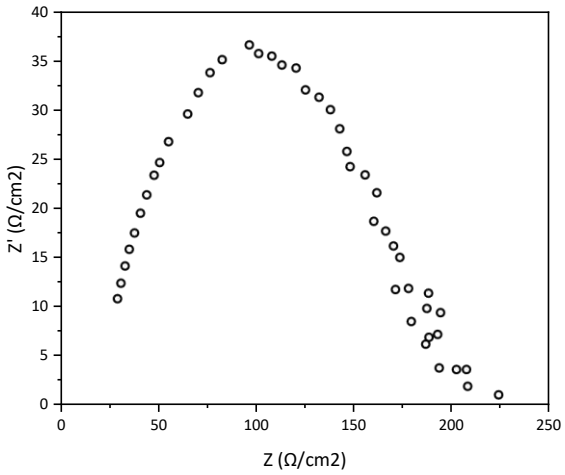


Figura 7. Caracterización por Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS): Tough Blanco

Por otro lado, la resina DLP Craftsman sin dopar (Figura 8) presenta una respuesta marcadamente capacitativa y de alta impedancia. Sus valores en el diagrama de Nyquist se ubican en el orden de los ohmios (Ω), mostrando una tendencia marcadamente dispersa. Este comportamiento confirma que la matriz base exhibe una resistencia a la transferencia de carga significativamente mayor a la registrada en la resina Tough.

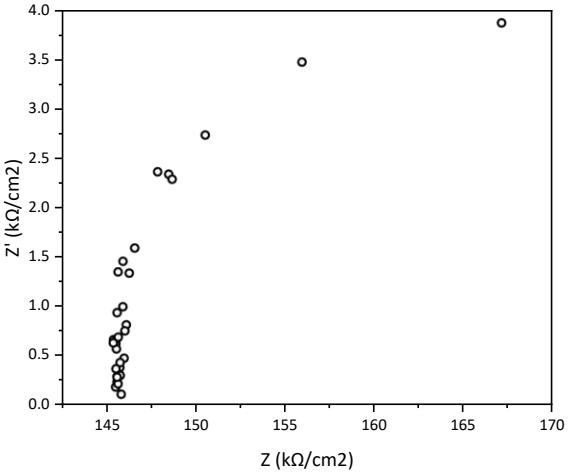


Figura 8. Caracterización por Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS): DLP Craftsman Blanco

En el sistema con NTCP en la resina Tough (Figura 9), conforme aumentó la concentración de NTCP de 0.007 % a 0.060 %, el diámetro del semicírculo incrementó de

manera continua, alcanzando su mayor valor al 0.060 %. Este resultado indica un aumento de la resistencia a la transferencia de carga, probablemente debido a la tendencia de los NTCP a formar aglomerados, reduciendo la continuidad de las rutas conductoras dentro de la matriz.

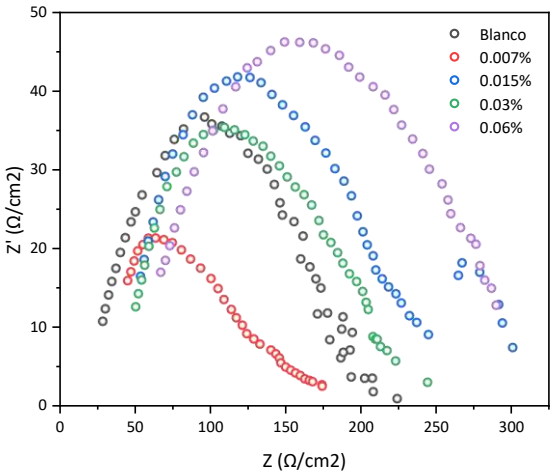


Figura 9. Caracterización por Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS): Tough NTCP

En el sistema con NTCC en la resina Tough (Figura 10), la dosis de 0.007 % logró la mayor reducción en el diámetro del semicírculo, registrando el menor arco de impedancia y menor resistencia a la transferencia de carga gracias a la buena dispersión inicial de los NTCC.

A concentraciones superiores (0.015 % y 0.030 %), el diámetro del semicírculo se incrementó de forma progresiva, mientras que la muestra al 0.060 % exhibió mayor dispersión. Este incremento en la impedancia a concentraciones más altas se atribuye tentativamente a la posible formación de aglomerados de nanotubos, lo que afectaría la distribución homogénea del nano-refuerzo y dificultaría la transferencia de carga eficiente en la matriz.

La comparación entre ambos sistemas demuestra que la funcionalización carboxílica mejora la interacción con la resina Tough y favorece una dispersión más homogénea del NTCC, logrando menores valores de impedancia en comparación con los NTCP, cuya aglomeración posiblemente incrementa la resistencia a la transferencia de carga al aumentar la dosis.

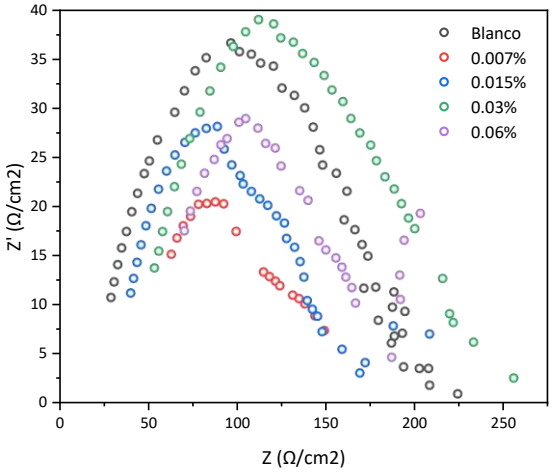


Figura 10. Caracterización por Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS): Tough NTCC

La formulación con NTCC al 0.007 % resultó ser la condición electroquímica más favorable al registrar la menor impedancia y resistencia en el espectro. Estos resultados confirman que la dispersión eficiente del nano-refuerzo es el factor determinante para optimizar la respuesta de la impedancia en la matriz polimérica.

En el sistema con NTCP en la resina DLP Craftsman (Figura 11), la incorporación del nano-refuerzo redujo sustancialmente la impedancia global de la matriz desde kilo-ohmios (kΩ) hasta el rango de ohmios para todas las concentraciones.

La muestra con 0.007 % de NTCP registró el arco de menor diámetro y la menor resistencia a la transferencia de carga. Al incrementar la carga al 0.015 % y 0.030 %, el diámetro del semicírculo aumentó progresivamente hasta alcanzar en ésta última el mayor arco capacitivo del grupo, seguido de una leve disminución al 0.060 %. Esto confirma que los NTCP modifican la alta impedancia intrínseca de la matriz desde concentraciones muy bajas.

En el sistema con NTCC en la resina DLP Craftsman (Figura 12), la incorporación del 0.007 % incrementó la resistencia a la transferencia de carga, manteniendo el espectro en la escala de los mega-ohmios (MΩ), representando el mayor arco capacitivo de este grupo.

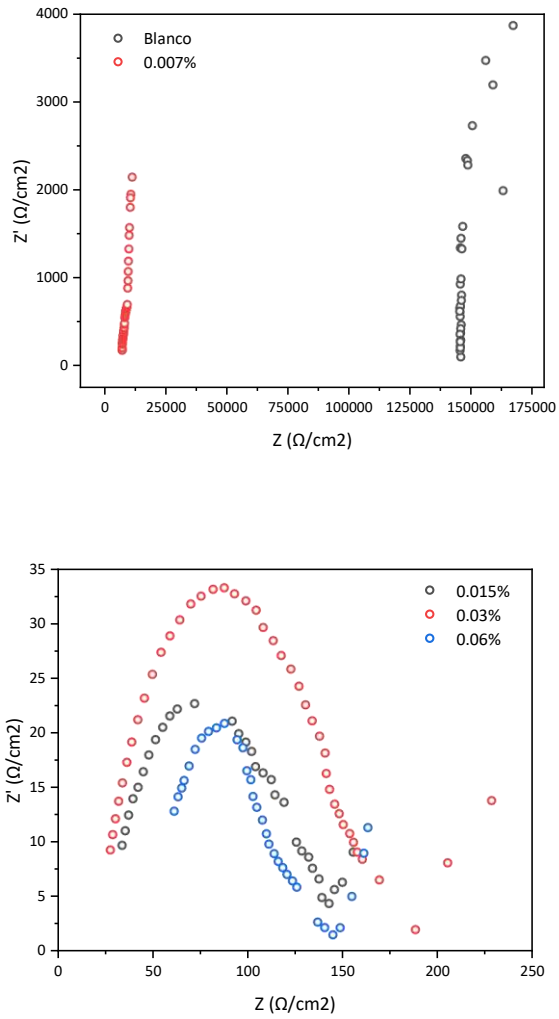


Figura 11. Caracterización por Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS): DLP Craftsman NTCP

En las concentraciones de 0.015% y 0.030%, se produjo una marcada reducción en el módulo de impedancia hacia el orden de los ohmios, reduciendo significativamente el diámetro del semicírculo respecto a la matriz sin dopar. Finalmente, la muestra al 0.060 % mostró un leve incremento en la impedancia capacitativa, aunque manteniéndose dentro de la escala de ohmios.

La comparación entre ambos sistemas demuestra que la resina DLP Craftsman es altamente sensible a la funcionalización con NTC. Mientras que los NTCP facilitan una transición directa hacia menores valores de resistencia desde dosis bajas, los NTCC promueven una elevada impedancia capacitativa a dosis mínima.

Número Especial "Verano de la Investigación
DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

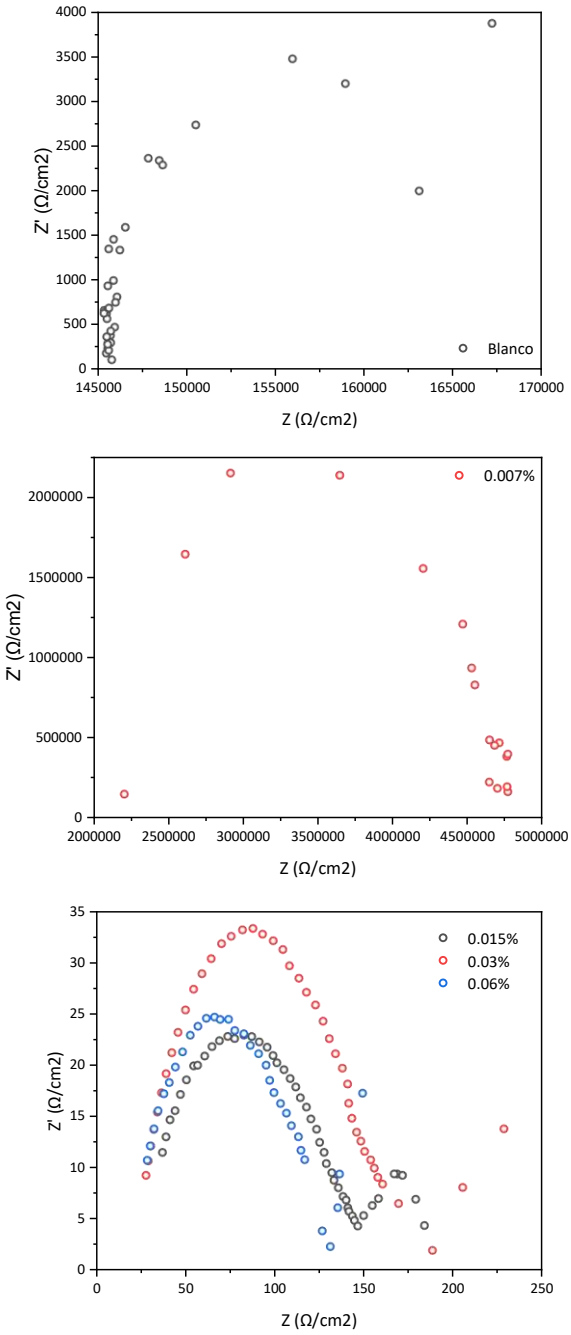


Figura 12. Caracterización por Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS): DLP Craftsman NTCC

En conjunto, los resultados confirman que el sistema con NTCP es el más efectivo para reducir la resistencia del material de forma homogénea en esta matriz, mientras que la formulación con NTCC al 0.007 % constituye

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

el comportamiento de mayor impedancia en el nanocompuesto.

4. Conclusiones

Los resultados confirman el cumplimiento de los objetivos al demostrar que la adición de NTC reduce la anisotropía propia de la impresión 3D mediante SLA, disminuyendo las variaciones de las propiedades mecánicas entre la orientación horizontal y la orientación vertical. Los NTCC fueron los más efectivos en homogeneizar los esfuerzos mecánicos. Además, la orientación vertical ofreció una resistencia mayor a la tensión y dureza base.

En el ámbito electroquímico, se logró un control efectivo de la impedancia: los NTCC al 0.007 % optimizaron la reducción de la resistencia a la transferencia de carga en la resina Tough. Por su parte, los NTCP mostraron una mayor capacidad para reducir la impedancia en la resina DLP Craftsman. Asimismo, se definió un rango de dopaje idóneo entre 0.007 % y 0.030 %, puesto que una dosis de 0.060 % perjudica el desempeño global.

Al evaluar de manera integral el comportamiento mecánico y la respuesta a la impedancia, la formulación con 0.030 % de NTCC en orientación vertical dentro de la resina Tough destaca como la condición más eficiente para maximizar el esfuerzo mecánico y la dureza. Por otro lado, la incorporación de NTCP al 0.007 % resulta la condición ideal para disminuir la resistencia a la transferencia de carga en la matriz DLP Craftsman.

Estos hallazgos permiten proyectar aplicaciones en la fabricación de carcasas con disipación electrostática y blindaje electromagnético, así como en dispositivos de protección ante impactos o encapsulados dieléctricos de alta precisión.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Guanajuato por el apoyo de este proyecto a través de la convocatoria CIIC 2026 (204/2026).

Referencias

Alli, Y. A., Anuar, H., Manshor, M. R., Bankole, O. M., Rahman, N. A. A., Olatunde, S. K., Omotola, E. O., Oladoye, P. O., Ejeromedoghene, O., Suhr, J., Sukindar, N.

A., y Nasir, N. A. M. (2023). Influence of nanocomposites in extrusion-based 3D printing: A review. *Hybrid Advances*, 3, 100069. https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2023.10006

Aravind Shanmugasundaram, S., Razmi, J., Mian, M. J., & Ladani, L. (2020). Mechanical Anisotropy and Surface Roughness in Additively Manufactured Parts Fabricated by Stereolithography (SLA) Using Statistical Analysis. *Materials*, 13, 2496. https://doi.org/10.3390/ma13112496

Clarissa, W. H., Chia, C. H., Zakaria, S., y Evyan, Y. C. (2022). Recent advancement in 3-D printing: nanocomposites with added functionality. *Prog Addit Manuf*, 7, 325-350. https://doi.org/10.1007/s40964-021-00232-z

Guo, A., Li, S., Wang, S., Zhai, Z., Qu, P., Guo, S., Kong, H., Tang, R., Liu, C., Han, W., & Hu, Y. (2024). Digital light processing of multi-walled carbon nanotubes-reinforced photosensitive resin composites: Effects on microstructures and mechanical properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 28, 434–445. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.187

Huang, L., Yu, Y., Sun, D., Qu, Y., Lin, S., Chu, W., Meng, F., Ren, J., Lu, Y., Su, Q., Du, G., y Xu, B. (2023). Porous single-crystal Ni5P4 nanosheets arrays coated with PANI layer for high efficiency hydrogen evolution at high current density in acid electrolyte. *Electrochimica Acta*, 467, 143092. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.143092

Kuribayashi, C., Hemkemaier, M. C., Barra, G. M. O., da Rocha, M. R., Soares, B. G., & Merlini, C. (2026). Effect of carbon nanotubes incorporation on the properties of a photopolymer resin used in vat photopolymerization. *Polymer Composites*, 71554. https://doi.org/10.1002/pc.71554

Li, Y., Wang, W., Wu, F., y Kankala, R. K. (2023). Vat polymerization-based 3D printing of nanocomposites: A mini review. *Frontiers in Materials*, 9, 1118943. https://doi.org/10.3389/fmats.2022.1118943

Organización Internacional de Normalización. (2012). *Plastics- Determination of tensile properties - Part 2: Test Conditions For Moulding and Extrusion Plastics* (ISO 527-2:2012).

Sardana, G., Nemade, K. H., Ghosh, S., & Bandyopadhyay-Ghosh, S. (2026). Orientation-dependent mechanical response of photopolymer resin specimens fabricated

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

by masked stereolithography-based 3D printing. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, 21, 00480. https://doi.org/10.1186/s40712-026-00480-3

Shen, Z., Wang, S., Bi, Y., Li, C., Wang, C., Li, H., y He, Y. (2026). Recent research progress on the dispersion methodologies and their application within carbon nanotube-based polymer composites. *Materials Today Chemistry*, 54, 103636. https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2026.103636