

Validación de la tecnología de impresión 3D por LCD para la fabricación de microcanales

Claudia M. Guido¹, M. A. González-López², Luis E. Lugo-Uribe³, Mariamne Dehonor-Gomez³, Georgina Montes de Oca-Ramírez³, Jan Mayen² e Isa Pereyra²

Posgrado CIATEQ A.C.¹, CONAHCYT-Centro de Tecnología Avanzada (CIATEQ)^{2,3}
Querétaro, Qro.¹; San Luis Potosí, S.L.P.²; Lerma, Edo. Mex.³; México
clau.m.guido@gmail.com, [mangel.gonzalez, isabel.pereyra]@ciateq.mx

Abstract— The most commonly manufacturing processes used nowadays to create microchannels tend to limit the extension of their use, therefore, through the exploration of the manufacturing of microchannels by means of 3D printing with Liquid Crystal Display technology, it is sought to open new possibilities that allow advances in fields such as engineering, medicine, electronics, ect. In this research, a quantitative methodology is used to validate the ability of the technology to manufacture microchannels using printers with different resolutions, using standard resin. It has been found that the use of 3D printing with Liquid Cristal Display technology is viable to manufacture microchannels in an accurate manner, which will enable greater adaptability in the design of systems that require these elements.

Keyword— 3D printing LCD printing, microchannel, microfluidics.

Resumen— Los procesos más utilizados actualmente para crear microcanales tienden a limitar la extensión de su uso, por lo que, mediante la exploración de fabricación de microcanales por medio de la impresión 3D con tecnología Liquid Cristal Display se busca abrir nuevas posibilidades que permitan avances en campos como ingeniería, medicina, electrónica, entre otros. En la presente investigación se utiliza una metodología cuantitativa para validar la capacidad de la tecnología para fabricar microcanales mediante el uso de impresoras con diferentes resoluciones, utilizando resina estándar. Se ha encontrado que el uso de impresión 3D con tecnología Liquid Cristal Display es viable para fabricar microcanales con precisión lo cual posibilitará una mayor adaptabilidad en el diseño de sistemas que requieren estos elementos.

Palabras claves— Impresión 3D, Impresión LCD, microcanal, microfluidos.

I. INTRODUCCIÓN

A. Tecnologías de Impresión 3D

La impresión 3D se caracteriza por ser una técnica de manufactura aditiva, donde se añade material capa tras capa hasta conformar un objeto. Esto contrasta con la manufactura por sustracción, en la cual se retira material para dar forma al objeto deseado. Peed y Lee (2018) mencionan que, aunque en sus inicios la impresión 3D fue clasificada dentro de las tecnologías de Prototipado Rápido (RP), en la actualidad, este término se ha vuelto versátil y puede intercambiarse con conceptos como Manufactura Rápida (RM), Tecnología de forma libre sólida (SFF, por sus siglas en ingles Solid Free Form), Fabricación digital directa (DDM, Direct Digital Manufacturing) y Manufactura Aditiva (AM).

Existen diferentes tecnologías de impresión 3D, siendo las siguientes las más extendidas, como Horvath (2014) las menciona:

- FDM (Fused Deposition Modeling): Esta tecnología de impresión 3D usa un filamento de plástico, el cual pasa por un extrusor caliente para finalmente colocar cada capa del objeto a producir.
- SLS (Selective Laser Sinthering): Tecnología de fusión selectiva que utiliza polvo como base y en la que se fusiona una capa con la siguiente por medio del empleo de láser.

- SLA (Stereolithography): Consiste en solidificación focalizada, en la que se fabrica un objeto curando capa por capa desde una tina de líquido a través de la aplicación selectiva luz UV.

La tecnología de impresión 3D se empezó a desarrollar en la década de 1980, en 1981, Hideo Kodama, del Nagoya Municipal Industrial Research Institute, fue el primero en publicar sobre un sistema de manufactura aditiva basada en un fotopolímero (Peed y Lee, 2018). Sin embargo, se le atribuye a Hull (1986) la creación del primer sistema de impresión 3D. Hull introdujo al mundo la tecnología Stereolithography (SLA), que se convertiría en el primer enfoque comercial de impresión 3D (3D Systems, Inc., s.f)

De acuerdo con Gibson, Rosen, Stucker, y Khorasami (2021), las tecnologías de impresión 3D continuaron evolucionando a lo largo de sus primeras décadas, impulsadas principalmente por las empresas que detentaban sus patentes. Sin embargo, con la expiración de estas patentes en los primeros años del siglo XXI, se presenció una expansión masiva en sistemas de impresión 3D, volviéndose más accesibles al público y basándose en las tecnologías previamente abordadas.

B. Impresión 3D con tecnología LCD (Liquid Cristal Display)

La tecnología de impresión 3D mediante LCD (Liquid Cristal Display) es un sistema emergente y reciente, derivado de la impresión 3D por SLA (Stereolithography), el cual se diferencia por el origen de la iluminación como anotan Zhu et al (2022), ya que la generación de las imágenes a curar se realiza mediante una pantalla LCD. Cuando esta pantalla se enciende, se aplica un campo eléctrico al cristal líquido, provocando un cambio en su disposición molecular, lo que genera que una parte de las moléculas bloquee la luz y otra parte sea transparente (Quan et al, 2020). Divjak, Matijević y Hajdek (2022) advierten que la luz ultravioleta proveniente de LEDs pasa a través de la zona transparente, curando la resina fotosensible y al realizarse los cambios en el campo eléctrico, algunas de las moléculas no se acomodarán por lo que podrá haber una ligera fuga de luz, causando que se reduzca la precisión de la tecnología.

El sistema de impresión 3D LCD utiliza fotopolímeros como material de construcción, lo cuales son resinas poliméricas líquidas termoendurecibles, sensibles a la luz. Se dice que estas resinas son “curadas” cuando se endurecen por medio de la exposición a la luz UV (Werner, Tonni y Lopes, 2023).

Gebhardt y Hötter (2016) mencionan que en general hay 3 maneras de procesar la información a la hora de generar imágenes para las capas de impresión 3D: por vector, rasterización o máscara. El proceso de vector es el más preciso, sin embargo, es también el más tardado y depende de la complejidad del contorno. El de rasterizado genera la capa línea por línea. Finalmente, el proceso de máscara produce la exposición de la capa completa de manera unificada, siendo mucho más efectivo en tiempo, como se puede observar en la figura 1. Es relevante destacar que la impresión 3D por LCD utiliza el proceso de máscara.

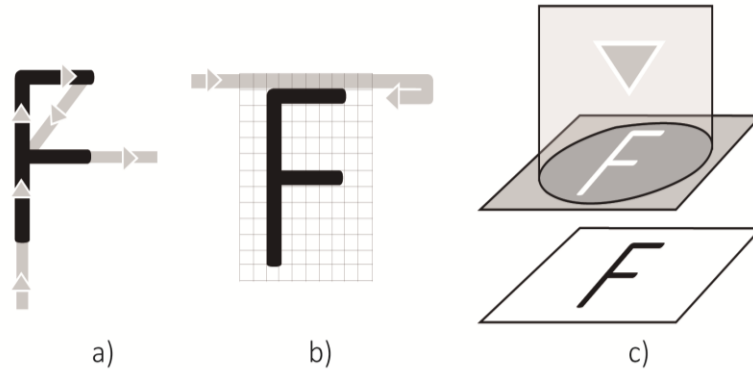


Fig. 1. Procesos de generación de imagen a) vector, b) rasterización, c) máscara.

C. Ventajas y desventajas de la impresión 3D por LCD

Werner, Tonni y Lopes (2023) analizan varias de las ventajas-desventajas de la impresión 3D:

1) Ventajas

- Capacidad para crear modelos 3D de alta calidad, permitiendo la impresión de piezas y estructuras complejas, lo cual supera a otras tecnologías de impresión, como se puede observar en la figura 2.
- Ausencia de anisotropía en las piezas, gracias a la técnica de curado utilizada.
- Amplia disponibilidad de máquinas en el mercado, favoreciendo por no estar restringida por patentes, lo que reafirman Sotov, A., Kantyukov, A., Popovich (2021).
- Proceso de impresión rápido, beneficiado por el método de enmascaramiento que permite imprimir toda la pantalla de una sola vez.
- Bajo costo comparativo con otros sistemas de impresión y otros procesos de manufactura, sobre todo a baja escala, Mohamed et al (2019) también lo expresan.
- Divjak, Matijević y Hajdek (2022) complementan con que las impresoras requiere poco mantenimiento, lo que es una ventaja para usuarios de esta tecnología.
-

2) Desventajas

- Capacidad de impresión en un volumen menor en comparación con otras tecnologías, con un promedio 1320 cm³.
- Curva de aprendizaje más extensa para configurar adecuadamente la impresora y alcanzar la mejor calidad de impresión.
- Necesidad de realizar post procesamiento y limpieza de las partes impresas.
- Manejo complicado de la resina, que tiene componentes tóxicos y es propensa a derramarse.
- La luz UV empleada para curar la resina puede dañar la pantalla LCD, lo que implica reemplazos periódicos. La vida útil de la pantalla varía entre 500 y 2000 horas, dependiendo del tipo de LCD y la intensidad de los LED UV (Zhu et al, 2022).



Fig. 2. Comparación de impresión 3D en LCD, izquierda y FDM, derecha (Werner, Tonni y Lopes, 2023).

D. Microcanales, definición y aplicaciones

Tarn y Pamme (2013) definen la microfluídica como el estudio de los sistemas que procesan pequeñas cantidades de fluidos, ya sean líquidos o gases, permitiendo su manipulación de manera precisa. Las diversas aplicaciones tecnológicas que tienen que ver con el control de los fluidos a pequeña escala, utilizan microcanales para su proceso (Juárez, 2020). Los microcanales cuyo rango de diámetro interno que debe tener varía de acuerdo con la bibliografía: Sarma, Chandra y Joshi, (2022) los definen en el rango de 200 μm a 10 μm ; Li (2015) determina que van desde 500 nm a 1 μm ; Prakash y Kumar (2015) desde 1 μm a 999 μm , coincidiendo con ellos Kabandana, Zhang y Chen (2022), quienes los identifican en el el rango de 1 μm a 1000 μm , por lo que, de manera general, se pueden considerar microcanales estando en el rango de escalas micrométricas. Los microcanales pueden tener, entre otros, formas longitudinales rectas, curvas en espiral o helicoidales, como mencionan Rehmani, Jaywant y Arif (2020) y las secciones transversales más comunes incluyen circulares, rectangulares, cuadradas, con forma de U, semicirculares o con forma de haz gaussiano (Prakash y Kumar, 2015).

La importancia de los microcanales reside en que pueden contener los fluidos para explorar los sistemas a escala por lo que sus aplicaciones van de la mano con campos en los que se requiere la conducción de fluidos de un espacio a otro, así como enfriamiento o calentamiento a microescala. Sus usos van desde las impresoras de inyección de tinta (Aryasomayajula, Bayat, Rezai y Selvaganapathy, 2017), dispositivos microfluídicos como microreactores (Mcmillan, Velvé-Caquillas, 2021), industria electrónica o medicina, ya sea para diagnóstico, análisis de ADN, monitorear biomarcadores (Harris, Wu, Zhang y Angelopoulou, 2022), administración de medicamento (Niculescu, Chircov, Bîrcă y Grumezescu, 2021), cultivo de órganos y tejidos (Merrin, 2019), entre otros.

Los microcanales suelen ser fabricados en diferentes materiales dependiendo de las propiedades que requieren su aplicación, se realizan en materiales como polímeros, que son flexibles, aislantes térmicos y eléctricos (Harris, Wu, Zhang y Angelopoulou, 2022); silicón, que es muy utilizado en aplicaciones biológicas; vidrio, el cual es muy popular para fabricación de microcanales debido a su estabilidad química, resistencia, dureza, transparencia; metales, sobre todo en las áreas de ingeniería mecánica y electrónica (Sarma, Chandra y Joshi, 2022); y algunos otros materiales utilizados en menor medida, como cuarzo, hidrogeles, nitruro de galio y recientemente materiales cerámicos y sistemas basados en papel (Prakash y Kumar, 2015).

Las tecnologías disponibles actualmente para crear microcanales resultan complejas, con un costo elevado o que requieren de configuraciones muy específicas para su fabricación que son difíciles de lograr, tales como microfresado, litografía, estampado, moldeo por inyección, grabado húmedo y seco como revisan Prakash y Kumar (2015) en su trabajo; también incluyendo moldeo por microalambre (Sarma, Chandra y Joshi, 2022), ablación láser y más recientemente, microfluídicos de papel (Harris, Wu, Zhang y Angelopoulou, 2022).

E. Hacia nuevas tecnologías de fabricación de microcanales

La relevancia de la impresión 3D en la microfluídica es notable, especialmente en la fabricación de microcanales. Como exponen Werner, Tonni, y Lopes (2023), esta tecnología ofrece una precisión y versatilidad que son cruciales para crear canales microscópicos con la exactitud necesaria en este campo, además de ser fácilmente replicable y con costo rentable incluso a pequeña escala. De acuerdo con Kabandana, Zhang y Chen (2022), en microfluídica, donde el manejo eficiente de fluidos a pequeña escala es esencial, la capacidad de la impresión 3D por LCD para producir componentes intrincados y precisos abre nuevas posibilidades para avanzar significativamente en áreas como el análisis biomédico, la administración de fármacos y la creación de dispositivos de laboratorio en un chip.

Hipotéticamente es posible imprimir con éxito microcanales utilizando la tecnología de impresión 3D por LCD utilizando impresoras LCD 4K y 8K, empleando resina estándar, lo cual puede demostrarse a través de prototipos de prueba y validación experimental. Las mayores problemáticas que se visualizan con la tecnología de impresión 3D LCD es su capacidad de crear los microcanales sin estructuras de apoyo, identificar el mejor ángulo y forma para no retener resina dentro del canal, así como las limitantes del diámetro mínimo que se pueda producir sin obstrucciones.

II. METODOLOGÍA

La validación de la tecnología de impresión 3D por LCD para la fabricación de microcanales se realizará mediante una metodología cuantitativa, desarrollando una investigación correlacional, tomando como variables la resolución de la impresora 3D, las dimensiones del microcanal en el modelo 3D versus las dimensiones del microcanal impreso, así como la dimensión mínima de impresión de microcanal sin obstrucción. En una validación paralela se verificará, de manera semicuantitativa, la diferencia en rugosidad superficial dependiendo de la resolución de la impresora.

Se utilizaron dos diferentes impresoras de tecnología LCD, ambas de la marca Phrozen:

- Sonic Mighty 4k: Cuenta con un volumen máximo de impresión de 20x12.5x22cm, pantalla LCD de 9.3” con resolución de 3840x2400 y precisión de 52 μm , grosor de capa de 0.01 a 0.3mm, fuente de luz de 405nm, como se aprecia en la figura 3.
- Sonic Mini 8k: Con volumen de impresión de 16.5 x 7.2 x 18cm, pantalla LCD de 7.1” con resolución de 7500x3272 y precisión de 0.22 μm , grosor de capa de 0.01 a 0.3mm, como se observa en la figura 4.



Fig. 3. Impresora 3D LCD Sonic Mighty 4k.



Fig. 4. Impresora 3D LCD Sonic Mini 8k.

Se realizaron pruebas con resina estándar tanto en impresora 4k como 8k para poder comparar los resultados entre las pruebas y verificar el impacto que la variable de la impresora tiene. El parámetro de grosor de capa se mantiene en $30\ \mu\text{m}$ y la potencia de la pantalla LCD se mantiene en 100%. El tiempo de curado es el tiempo que la imagen correspondiente a la capa que se está imprimiendo permanece mostrándose en la pantalla LCD, el cual correspondió a 1.25 s para las pruebas presentes.

La probeta que se utilizó para validación es un tester de impresión de la misma marca de las impresoras, la cual cuenta con microcanales de impresión directa por lo que no se requiere de moldes para su fabricación, como se muestra en la figura 5. Las dimensiones totales de la pieza son de $6\text{cm} \times 6\text{cm} \times 1\text{cm}$ de altura. Se decidió utilizar esta probeta ya que presenta microcanales abiertos y cerrados con diferentes características y dimensiones, para efectos de este estudio el alcance se va a centrar en dos tipos de muestras:

- Microcanales cerrados circulares cuyo diámetro va desde $100\ \mu\text{m}$ a $1000\ \mu\text{m}$, para realizar una comparativa dimensional.
- Microcanales abiertos con patrón hexagonal, para observar la diferencia en rugosidad superficial.

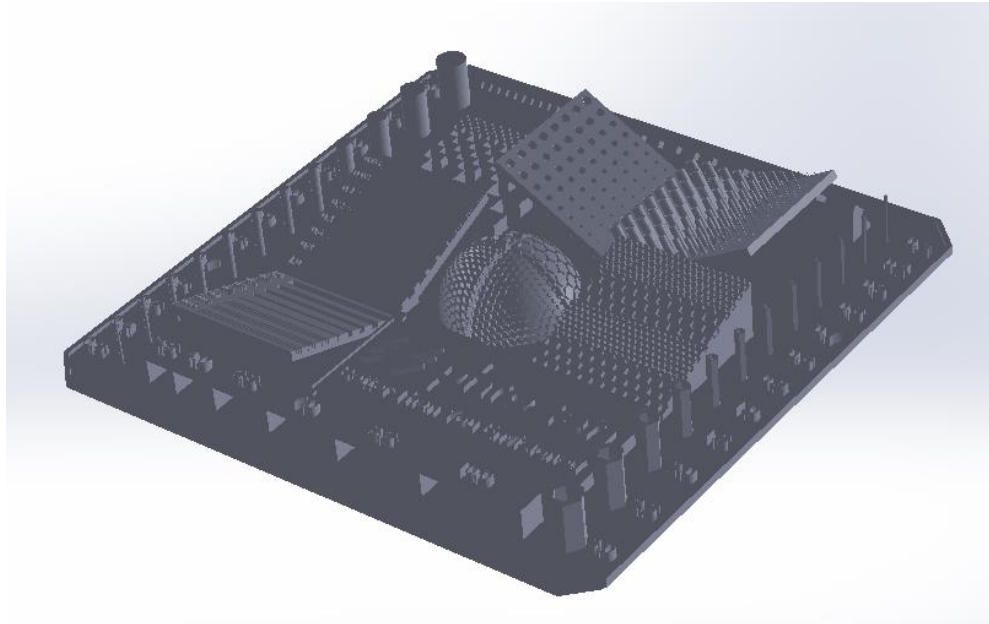


Fig. 5. Probeta de validación.

Se imprime una probeta con cada impresora, la cual contiene 5 muestras de cada diámetro de microcanal cerrado y un patrón de canales abiertos hexagonales sobre superficie esférica. Considerando las variables anteriores se realizaron los siguientes experimentos incluidos en la tabla I.

Tabla I. Matriz de experimentos.

	impresora 4K	impresora 8K
tiempo de curado	1.25s	1.25s
resina	estándar	estándar
grosor de capa	30 μm	30 μm

A. *Pasos para realizar la impresión*

- Se verifica y configura el modelo a imprimir: fuente de luz en 100%, tiempo de curado de 1.25s y grosor de capa de 30 μm . Es importante considerar que la orientación en la que se configure la impresión de la probeta tendrá impacto en los resultados, debido al área de contacto entre la capa ya impresa y la nueva resina. En este caso, realizaremos el análisis sobre una superficie esférica para poder estudiar la diferencia en rugosidad que representa el cambio en área de contacto a través de la variación del ángulo a lo largo de la circunferencia. El área de contacto depende además de tamaño de pixel y grosor de capa (ver figura 6), por lo que se proyecta una superficie menos rugosa en la probeta fabricada con la impresora 8K.

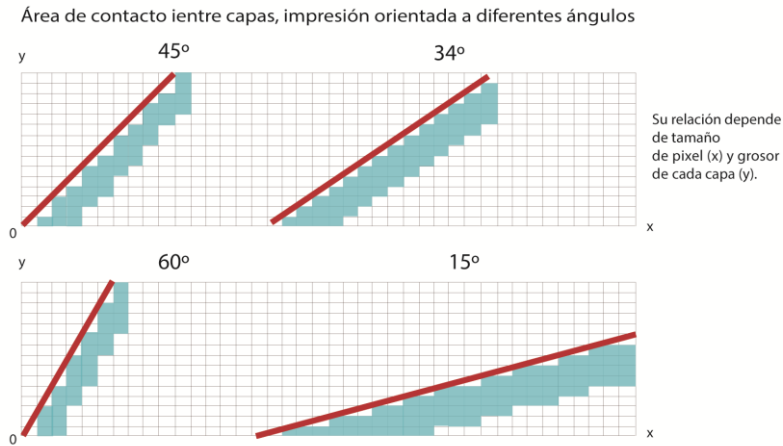


Fig. 6. Efecto de la orientación de la pieza en el acabado superficial.

- Se enciende la impresora y se realiza calibración del equipo en eje (ver figura 7). Se coloca la bandeja y se vierte resina en ella (ver figura 8). Se confirma la selección el archivo a imprimir para que la máquina comience a fabricar capa por capa.



Fig. 7. Calibración del equipo en eje z.

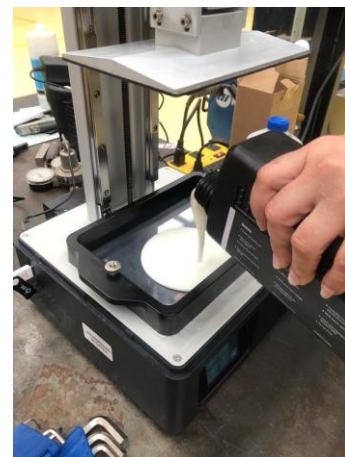


Fig. 8. Se vierte resina en la bandeja.

- Una vez que se comienza a imprimir, la placa de construcción se sumerge en la resina, separándose de la base de la tina 30 μm , la dimensión que se definió como el parámetro para el grosor de cada una de las capas. La pantalla LCD se enciende y proyecta la primera rebanada o capa, la cual permanece durante 1.25s.
- Finalizado el curado de la primera capa, la placa de construcción se mueve hacia arriba, despegando la primera capa. La placa se mueve hacia debajo de nuevo, para colocarse a la distancia de otra capa de la base de la tina, posteriormente se cura la segunda capa de resina, la cual se adhiere a la primera, como se puede ver en la figura 9.

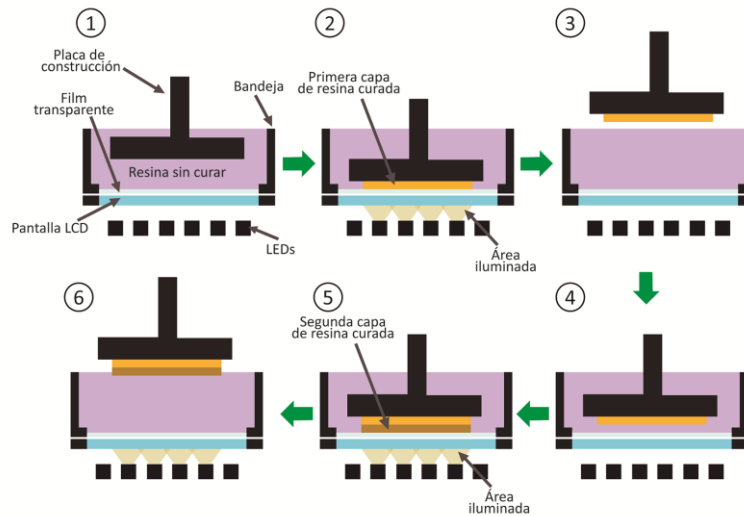


Fig. 9. Workflow de impresión 3D SLA LCD.

- Una vez terminada de imprimir la pieza, esta se lava, para quitar todos los residuos que queden de resina que no se haya curado de los microcanales. Las piezas se lavaron con agua 15 minutos y posteriormente se secaron con aire comprimido.
- Una vez impresas las piezas, la recolección de datos se realizará por medio de observación y microscopía óptica para la medición dimensional. Se considera una alta replicabilidad de los experimentos realizados.

III. RESULTADOS

Se llevó a cabo un análisis detallado de las micrografías obtenidas a partir de las impresiones realizadas utilizando impresoras LCD de 4K y 8K. Este análisis se centró en evaluar la precisión dimensional y la calidad de la superficie de los microcanales impresos a un nivel semicuantitativo.

A través de una serie de inspecciones mediante microscopía óptica 3D se han obtenido las mediciones de cinco diferentes muestras de cada una de las dimensiones determinadas en el modelo 3D. Se utilizó un microscopio digital marca Keyence serie VHX 970F para realizar las mediciones. En las siguientes tablas, se observan los datos obtenidos de la evaluación realizada a cada uno de los microcanales o perforaciones tanto para 4k (ver tabla II) como para 8k (ver tabla III). Se aprecia que las mediciones de los microcanales en 8k se aproximan más las dimensiones originales en el diseño, también se observa que la desviación estándar para el caso 8k está en un máximo de 0.03, mientras que para el caso de 4k alcanza valores máximos de 0.08 lo que indica incluso una mayor reproducibilidad en el caso 8k. En el caso de la impresora 4k no se han logrado obtener microcanales de 200µm sin obstrucciones.

Tabla II. Mediciones impresora 4K

<i>Mediciones</i>	Impresora 4K								
	<i>1000 μm</i>	<i>900 μm</i>	<i>800 μm</i>	<i>700 μm</i>	<i>600 μm</i>	<i>500 μm</i>	<i>400 μm</i>	<i>300 μm</i>	<i>200 μm</i>
1	880	760	690	600	500	450	350	300	\
2	860	780	730	600	550	430	310	290	\
3	750	790	740	610	620	360	350	300	\
4	920	790	780	610	640	420	330	240	\
5	920	750	780	640	640	450	360	250	\
Media	866	774	744	612	590	422	340	276	\
Desviación estándar	69.86	18.17	37.82	16.43	62.45	37.01	20.00	28.81	\

Tabla III. Matriz de experimentos impresora 8K

<i>Mediciones</i>	Impresora 4K								
	<i>1000 μm</i>	<i>900 μm</i>	<i>800 μm</i>	<i>700 μm</i>	<i>600 μm</i>	<i>500 μm</i>	<i>400 μm</i>	<i>300 μm</i>	<i>200 μm</i>
1	960	880	760	730	560	450	390	330	200
2	940	896	760	680	590	470	370	300	250
3	980	880	780	690	570	480	380	300	220
4	980	860	790	700	610	470	390	310	200
5	970	890	780	660	600	450	380	280	250
Media	966	881.20	774	692	586	464	382	304	224
Desviación estándar	16.73	13.68	13.42	25.88	20.74	13.42	8.37	18.17	25.10

Con base en los datos cuantitativos, se ha observado que la variación promedio en las dimensiones finales de los detalles impresos con tecnología 8K es de aproximadamente un 4%, lo cual es considerablemente menor en comparación con la variación superior al 10% observada en las impresiones realizadas con la impresora 4K. Como se ilustra en la figura 10, las micrografías de las impresiones realizadas con la impresora 8K muestran una notable precisión en la reproducción de los detalles del modelo 3D original.

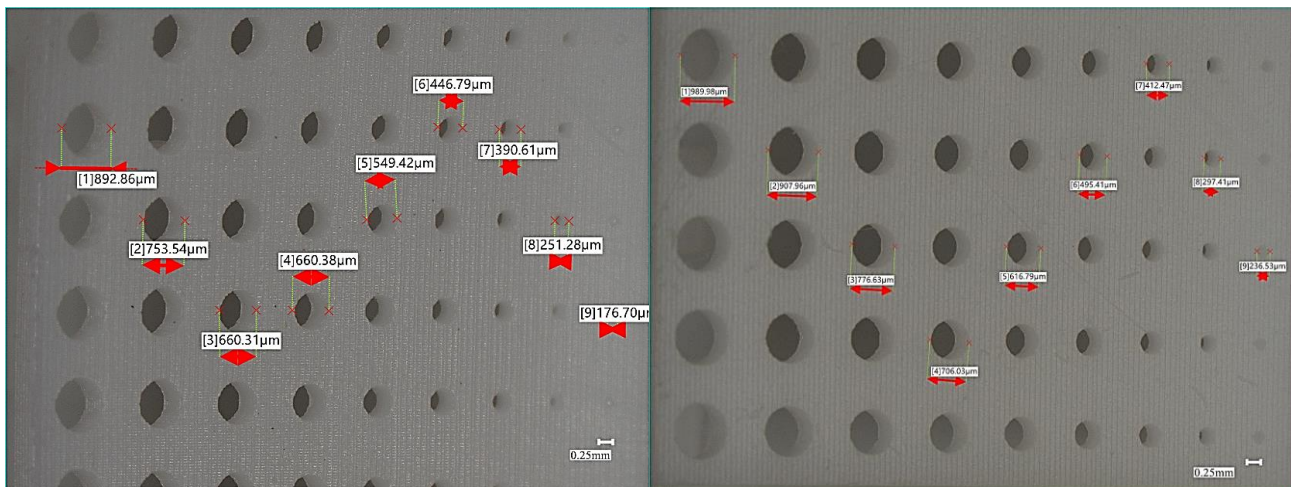


Fig. 10. Comparación dimensional y acabado superficial en 4k y 8k.

De manera análoga, al analizar la calidad superficial de los microcanales, se ha detectado una menor rugosidad en las impresiones 8K. Este hallazgo es crucial, ya que una superficie más lisa es esencial para aplicaciones en microfluídica, donde la interacción fluido-superficie juega un papel crítico. La

figura 11 presenta una comparativa detallada de la rugosidad superficial cualitativa observada en ambas tecnologías, destacando la superioridad de la impresora 8K en este aspecto. Estos resultados coinciden con la proyección realizada de acuerdo con la mayor resolución de dicha impresora.

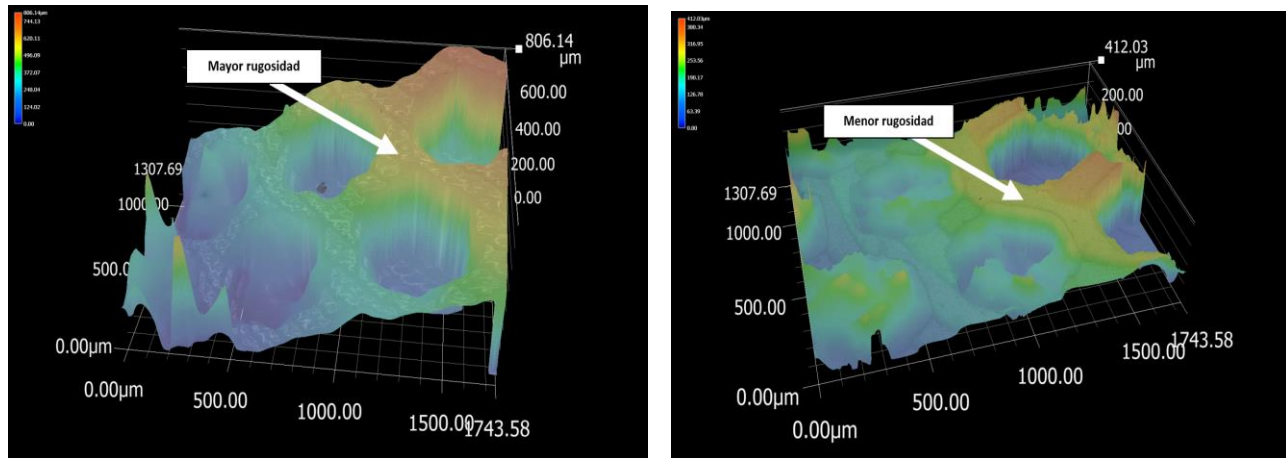


Fig. 11. Determinación cualitativa de la rugosidad en 4k y 8k.

La metodología de inspección empleada para la captura y análisis de las micrografías incluyó el uso de técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes, similares a las empleadas en estudios previos de caracterización de materiales. Esto permitió una evaluación precisa y detallada de las características tanto dimensionales como superficiales de las microtexturas con canales impresos.

En resumen, los resultados obtenidos en este estudio demuestran claramente la superioridad de la tecnología de impresión 3D LCD 8K sobre la 4K para la fabricación de microcanales. Esta superioridad se manifiesta tanto en la precisión dimensional como en la calidad de la superficie, aspectos fundamentales para su aplicación en campos avanzados como la microfluídica.

IV. CONCLUSIONES

La investigación llevada a cabo en este estudio ha demostrado de manera contundente la viabilidad y eficacia de la tecnología de impresión 3D LCD, específicamente utilizando impresoras de 8K, en la fabricación de microcanales. Estos hallazgos abren un panorama prometedor para la producción de componentes críticos en el campo de la microfluídica, ofreciendo un nivel de precisión y calidad superficial que era difícilmente alcanzable con tecnologías anteriores.

La superioridad de la impresión 3D LCD 8K sobre la versión 4K se ha evidenciado claramente en los aspectos críticos de precisión dimensional y calidad de superficie. Con una variación dimensional promedio del 4% en comparación con el modelo 3D original, la tecnología 8K ofrece una fidelidad notablemente superior. Esto es crucial para aplicaciones donde las dimensiones exactas de los microcanales son fundamentales para el rendimiento y la funcionalidad del sistema.

La notable reducción en la rugosidad superficial observada en las impresiones 8K conlleva implicaciones importantes para la eficiencia y la estabilidad de los sistemas de microfluídica. Una superficie más lisa reduce la resistencia al flujo y mejora la interacción fluido-superficie, características esenciales para el diseño de sistemas microfluídicos más eficientes y efectivos. De acuerdo con esta información, se ha podido determinar que la tecnología de impresión 8K supera significativamente a la de 4K en términos de resolución y fidelidad de reproducción.

REFERENCIAS

- [1] Peed, E., & Lee, N. (2018). 3D Printing, History of. En N. Lee (Ed.), *Encyclopedia of Computer Graphics and Games* (pp. 1-8). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08234-9_279-2
- [2] Horvath, J. (2014). A Brief History of 3D Printing. En J. Horvath (Ed.), *Mastering 3D Printing* (pp. 3-10). Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-0025-4_1
- [3] Hull, C. W. (1986). Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography (United States Patent US4575330A). <https://patents.google.com/patent/US4575330/en>
- [4] 3D Systems, Inc. - Governance—Board of Directors—Person Details. (s. f.). Consultado 22 de diciembre de 2023, de <https://investor.3dsystems.com/governance/board-of-directors/person-details/default.aspx?ItemId=7f9556d4-2c93-400f-af75-74f86511b5f9>
- [5] Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). Development of Additive Manufacturing Technology. En I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, & M. Khorasani (Eds.), *Additive Manufacturing Technologies* (pp. 23-51). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7_2
- [6] Zhu, J., Wu, P., Chao, Y., Yu, J., Zhu, W., Liu, Z., & Xu, C. (2022). Recent advances in 3D printing for catalytic applications. *Chemical Engineering Journal*, 433, 134341. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.134341>
- [7] Quan, H., Zhang, T., Xu, H., Luo, S., Nie, J., & Zhu, X. (2020). Photo-curing 3D printing technique and its challenges. *Bioactive Materials*, 5(1), 110-115. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2019.12.003>
- [8] Algebra University College, Zagreb, Croatia, Divjak, A., Matijević, M., University of Zagreb, Faculty of Graphic Arts, Zagreb, Croatia, Hajdek, K., & University North, Koprivnica, Croatia. (2022). Review of photopolymer materials in masked stereolithographic additive manufacturing. *Proceedings - The Eleventh International Symposium GRID 2022*, 431-438. <https://doi.org/10.24867/GRID-2022-p46>
- [9] Werner, H., Tonni, G., & Lopes, J. (2023). (3D) Printing Technologies. En H. Werner, G. Tonni, & J. Lopes (Eds.), *3D Physical and Virtual Models in Fetal Medicine: Applications and Procedures* (pp. 37-60). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14855-2_4
- [10] Gebhardt, Andreas, Hötter, Jan-Steffen (2016). *Additive Manufacturing—3D Printing for Prototyping and Manufacturing*. Hanser Publishers. Recuperado 22 de diciembre de 2023, de <https://app.knovel.com/kn/resources/kpEGPROF13/toc>
- [11] Sotov, A., Kanyukov, A., Popovich, A., & Sufiiarov, V. (2021). LCD-SLA 3D printing of BaTiO₃ piezoelectric ceramics. *Ceramics International*, 47(21), 30358-30366. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.07.216>
- [12] Mohamed, Mohamed G. A., Hitendra Kumar, Zongjie Wang, Nicholas Martin, Barry Mills, and Keekyoung Kim. (2019). Rapid and Inexpensive Fabrication of Multi-Depth Microfluidic Device using High-Resolution LCD Stereolithographic 3D Printing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 3, no. 1: 26. <https://doi.org/10.3390/jmmp3010026>
- [13] Tarn, M., & Pamme, N. (2013). Microfluidics. En *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering* (pp. 1-7). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409547-2.05351-8>
- [14] Juárez, J.M. (2020). La microfluídica puede permitir grandes avances en la Medicina y otras áreas: Eugenia Corvera—Facultad de Química. Consultado el 22 de diciembre de 2023, de <https://quimica.unam.mx/la-microfluidica-puede-permitir-grandes-avances-en-la-medicina-y-otras-areas-eugenia-corvera/>
- [15] Sarma, U., Chandra, P., Joshi, S.N. (2022). Advanced Microchannel Fabrication Technologies for Biomedical Devices. *Advanced Micro- and Nano-manufacturing Technologies. Materials Horizons: From Nature to Nanomaterials*. Springer, Singapore, 127-143. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3645-5_6

- [16] Li, D. (2015). Microchannel. *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics*. Springer, New York, NY, 1834-1835. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5491-5_200169
- [17] Prakash, S., & Kumar, S. (2015). Fabrication of microchannels: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 229(8), 1273-1288. <https://doi.org/10.1177/0954405414535581>
- [18] Kabandana, G.K., Zhang, T., & Chen, C. (2022). Emerging 3D printing technologies and methodologies for microfluidic development. *Analytical methods : advancing methods and applications*. <https://doi.org/10.1039/d2ay00798c>
- [19] Rehmani, M. A. A., Jaywant, S. A., & Arif, K. M. (2020). Study of Microchannels Fabricated Using Desktop Fused Deposition Modeling Systems. *Micromachines*, 12(1), 14. <https://doi.org/10.3390/mi12010014>
- [20] Aryasomayajula, A., Bayat, P., Rezai, P., & Selvaganapathy, P. R. (2017). Microfluidic Devices and Their Applications. En B. Bhushan (Ed.), *Springer Handbook of Nanotechnology* (pp. 487-536). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-54357-3_16
- [21] Mcmillan, A., Velvé-Casquillas, G. (2021). Microreactors & Microfluidics in Chemistry – a Review. Elveflow. . Consultado el 22 de diciembre de 2023, de <https://www.elveflow.com/microfluidic-reviews/general-microfluidics/microreactors-and-microfluidics-in-chemistry-a-review/>
- [22] Harris, M., Wu, H., Zhang, W., & Angelopoulou, A. (2022). Overview of recent trends in microchannels for heat transfer and thermal management applications. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 181, 109155. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.109155>
- [23] Niculescu, A.-G., Chircov, C., Bîrcă, A. C., & Grumezescu, A. M. (2021). Fabrication and Applications of Microfluidic Devices: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/ijms22042011>
- [24] Merrin, Jack. (2019). "Frontiers in Microfluidics, a Teaching Resource Review" *Bioengineering* 6, no. 4: 109. <https://doi.org/10.3390/bioengineering6040109>