

Pasta cerámica de bajo costo para impresión 3D

J. J. Avila-Navarrete¹, J. Antonio Muñoz-Gómez²

¹Estudiante Posgrado Ciencia e Ingeniería de Materiales, Departamento de Ingenierías, Universidad de Guadalajara, Av. Independencia Nacional No. 151, Autlán, Jalisco, México

²Departamento de Ingenierías, Universidad de Guadalajara, Av. Independencia Nacional No. 151, Autlán, Jalisco, México

Resumen: Los métodos de fabricación aditiva basados en la extrusión han surgido como una propuesta contemporánea para el desarrollo de nuevos materiales. En este trabajo se propone el desarrollo de una pasta cerámica para impresión 3D de bajo costo con materiales comerciales y de fácil acceso. Lo cual es una alternativa accesible para la manufactura aditiva cerámica en contextos académicos y de laboratorio. La pasta acrílica (Ready-Mix) es modificada mediante la adición de caolín y cemento blanco, para mejorar la resistencia mecánica y su comportamiento dinámico en procesos de extrusión. Se incorporó caolín (0–30%) y cemento blanco (10%). La formulación con 20% de caolín mostró la mejor relación entre estabilidad estructural y resistencia a la compresión (6.32 MPa a 35 días). Las piezas elaboradas tienen geometrías complejas con un acabado superficial homogéneo, lo cual demuestra la factibilidad de la propuesta.

Palabras clave: Impresión 3D; cerámica; extrusión DIW; caolín; resistencia mecánica.

1. Introducción

En las últimas décadas, la manufactura aditiva (impresión 3D) ha incidido en diversos campos de las ciencias y las ingenierías, tales como la arqueología, industria automotriz y militar, fabricación de prótesis médicas, componentes aeroespaciales, diseño de calzado deportivo y, recientemente la impresión 3D in-situ de estructuras habitacionales [1-4]. La tecnología para imprimir objetos tridimensionales se originó hace tres décadas con el desarrollo de la fotopolimerización de resinas cerámicas mediante máquinas de control numérico computarizado (CNC) [5]. No obstante, su masificación global ocurrió durante la última década, impulsada por la adopción de impresoras de extrusión de material fundido por capas (FDM, Fused Deposition Modeling), las cuales redujeron costos y crearon una cultura de innovación [6].

El auge de la impresión tridimensional se debe, en gran medida, a la capacidad de fabricar estructuras complejas de forma eficiente y personalizada, la fabricación en casa, y costes cada vez menores. Esto ha ampliado significativamente las posibilidades de diseño-experimentación y ha democratizado su fabricación en universidades y laboratorios [7, 8]. Aunado al desarrollo de impresión con polímeros, en los últimos años ha emergido la impresión 3D de objetos con pastas cerámicas, las cuales son consideradas como materiales de alto rendimiento debido

a su dureza, alta resistencia al desgaste, a la temperatura y a la corrosión, así como a sus buenas propiedades mecánicas. Tiene incidencia en industrias modernas como la energética, aeronáutica, militar y química, entre otros [9, 10].

En este trabajo se aborda la técnica de extrusión directa de pasta (DIW, Direct Ink Writing), un método de impresión 3D basado en la extrusión de materiales viscosos, como pastas cerámicas, mediante el control preciso de la velocidad y presión de flujo. Este método permite depositar el material capa por capa a través de una boquilla. Las ventajas de la técnica DIW son: (a) incorporación de nuevos agregados al material base, (b) costo reducido del equipo, y (c) pérdidas mínimas del material durante el proceso de impresión.

En el trabajo de Chen et al. [11], se revisaron los avances recientes en la impresión 3D de cerámicas, incluyendo técnicas como la estereolitografía (SL), el procesamiento digital de luz (DLP) y DIW. Los autores destacaron que estas tecnologías permiten la fabricación de componentes cerámicos con geometrías complejas que son difíciles de lograr con métodos tradicionales.

La conversión de una impresora clásica FDM a una impresora para cerámicos fue desarrollada en 2022. Mediante la modificación de la estructura y el cabezal de impresión, se logró trabajar con una mezcla de arcilla cerámica de la marca WASP, utilizando relaciones agua/arcilla entre 0.57 y 0.69. Los resultados demostraron la viabilidad de imprimir formas complejas, con una resistencia a la compresión de hasta 9.6 N/mm^2 después del secado y cocción [12].

Revelo y Colorado analizaron la impresión 3D de cerámicas basadas en arcilla de caolinita utilizando la técnica DIW. Optimizaron la relación agua/arcilla (W/C) y determinaron que una W/C de 0.60 proporcionaba el mejor equilibrio entre fluidez y estabilidad dimensional durante la impresión. Tras la sinterización a $1100 \text{ }^\circ\text{C}$, las muestras impresas alcanzaron una resistencia a la compresión de 20-50 MPa [14].

En Ordóñez et al., se investigó la impresión 3D tipo DIW, utilizando una pasta cerámica de uso industrial proporcionada por la empresa Suministros de Colombia S.A.S., y aditivos como silicato de sodio y poliácrlato de sodio. Las formulaciones con 50% de pasta y poliácrlato de sodio mostraron la mejor estabilidad dimensional y resistencia a la compresión (hasta 264 MPa), con una menor contracción durante el secado y sinterización. El estudio concluyó que la técnica DIW es viable para fabricar componentes cerámicos complejos, con aplicaciones en la construcción y la manufactura tradicional [15].

La formulación basada en arcilla fue analizada por Alonso Madrid et al., quienes abordaron la impresión desde una perspectiva de sostenibilidad, utilizando arcillas comerciales y enfocándose en su reutilización en el sector de la arquitectura, ingeniería y construcción. Se analizaron aspectos técnicos como la extrusión, la pérdida de propiedades según el tipo de protección y la reutilización de la arcilla en

múltiples ciclos de impresión. Los resultados demostraron que la arcilla puede reutilizarse indefinidamente si se protege de la exposición directa a materiales húmedos como el cemento, manteniendo sus propiedades plásticas [16].

En este trabajo, se desarrolla una pasta cerámica de bajo costo –basada en resinas acrílicas- para impresión 3D. La base es la pasta comercial Ready-Mix, la cual es modificada experimentalmente mediante la incorporación de caolín (0-30%), cemento (10%) y bórax (0.5%). Estas adecuaciones modifican las propiedades reológicas y proveen de una extrusión estable. Asimismo, se busca evaluar el desempeño mecánico del material a través de ensayos de compresión, así como analizar la morfología y estabilidad de las piezas generadas tridimensionalmente.

El resto de este artículo está organizado de la siguiente manera: en la Sección 2, se describe la metodología para transformar una pasta cerámica comercial para su uso en impresión 3D. Asimismo, se muestra el proceso de caracterización y la impresora 3D. En la Sección 3, se analizan los datos obtenidos de la micrografía y las pruebas de dureza del material compuesto, además se muestran diversas piezas impresas tridimensionalmente. Por último, en la Sección 4, se exponen las principales conclusiones.

2. Metodología

En esta sección se describe el procedimiento para modificar la pasta cerámica comercial Ready-Mix, con el objetivo de transformarla para su uso en impresoras 3D cerámicas. Aunado a ello, se describe la metodología para realizar la resistencia a la compresión, y se muestra a detalle la impresora utilizada.

Los materiales empleados en este estudio incluyeron: caolín comercial (PROMI), cemento blanco Portland CPC 30R-B (CEMEX), borato de sodio (Fafgalab), y pasta comercial Ready-Mix Estándar Plus (Panel Rey). La pasta es utilizada como base en las formulaciones, es un producto monocomponente a base de resinas acrílicas, cuyo uso es el de un compuesto blanco multiusos, con excelente capacidad de adherencia, especialmente formulado para aplicaciones iniciales, tratamiento de juntas y trabajos de resane en paneles de yeso, principalmente en interiores. Asimismo, es adecuada para reparaciones superficiales y procesos de restauración en ambientes domésticos.

La pasta Ready-Mix está compuesta por agua, sulfato de calcio, carbonato de calcio, minerales, adhesivos vinílicos y otros aditivos. Este material cumple con la norma ASTM C-475, siguiendo los procedimientos establecidos en la norma ASTM C-474. No contiene asbesto, lo que garantiza su seguridad en aplicaciones constructivas. Entre sus propiedades físicas destacan una excelente adherencia, densidad entre 1.62 y 1.75 g/cm³, bajo encogimiento y alta resistencia al agrietamiento. Estas características brindan la posibilidad de utilizarla como elemento base para la creación de un nuevo material para impresión 3D [17-19]. La

dureza final del material y su homogeneidad en la impresión son características que se incorporan mediante la adición de cemento y caolín.

El caolín se incorporó en las proporciones de 0%, 10%, 20% y 30%, en relación con la masa total seca de la formulación. El contenido de cemento y bórax se mantuvo constante en 10% y 0.5%, respectivamente. Estas proporciones fueron seleccionadas para evaluar sistemáticamente el efecto del caolín en las propiedades físicas, mecánicas y estéticas de las pastas cerámicas impresas.

Las formulaciones se identificaron mediante una nomenclatura basada en el porcentaje de caolín presente en la mezcla, utilizando la letra "C" seguida del valor correspondiente. Por ejemplo, la formulación C10 indica un 10% de caolín en la mezcla. En la Tabla 1 se detallan las proporciones exactas de cada componente para las cuatro formulaciones estudiadas, proporcionando una referencia clara para la reproducibilidad del estudio.

Tabla 1. Formulaciones respecto a la masa total.

Formulación	Caolín (%)	Cemento (%)	Bórax (%)	Ready-Mix (%)
C0	0	10	0.5	89.5
C10	10	10	0.5	79.5
C20	20	10	0.5	69.5
C30	30	10	0.5	59.5

El proceso de preparación de la pasta cerámica comenzó con tamizar los polvos a través de un tamiz de malla 140 (100 μm) para eliminar impurezas y asegurar una distribución uniforme de las partículas. Posteriormente, se pesaron siguiendo las proporciones establecidas en la Tabla 1. Las mediciones se realizaron utilizando una balanza digital de alta precisión (Boeco, modelo BAS 31 plus). Los polvos (caolín, cemento y bórax) se mezclaron manualmente en seco en un recipiente de acero inoxidable, asegurando una distribución uniforme y previniendo la formación de grumos que pudieran comprometer la homogeneidad de la mezcla.

Cabe resaltar que para la etapa anterior de mezclado se creó un agitador helicoidal de dimensiones 10 cm (largo) x 8 cm (ancho). Este dispositivo fue impreso en 3D empleando un filamento ABS de la marca Bambu Lab. Este elemento fue acoplado a un taladro eléctrico y operado a una velocidad angular constante de 300 rpm durante 5 minutos.

Posteriormente, se incorporó de forma gradual la pasta Ready-Mix, la cual contiene un 45% de agua. Este paso se realizó mientras se mantenía la agitación mecánica constante durante 10 minutos, logrando una dispersión uniforme de la pasta Ready-Mix en la mezcla. La adición gradual de este componente permitió evitar la formación de grumos y asegurar una integración homogénea de los materiales.

Para finalizar, se realizó un amasado manual con el objetivo de ajustar la consistencia de la pasta. Este proceso de amasado manual se prolongó por un período de 10 minutos. Este proceso permitió eliminar burbujas de aire y garantizar una pasta homogénea.

2.1 Resistencia a la compresión

La evaluación de las propiedades mecánicas de materiales cerámicos endurecidos es fundamental para determinar su desempeño estructural y aplicabilidad en diversos campos de la ingeniería. En este estudio, se emplearon ensayos de compresión para caracterizar el comportamiento mecánico de las pastas cerámicas, analizando diferentes períodos de curado.

El ensayo a compresión se llevó a cabo conforme a la norma ASTM C109/C109M-21. Para ello, se fabricaron especímenes cúbicos de 50 mm × 50 mm × 50 mm utilizando moldes de acero inoxidable, ver Figura 1.

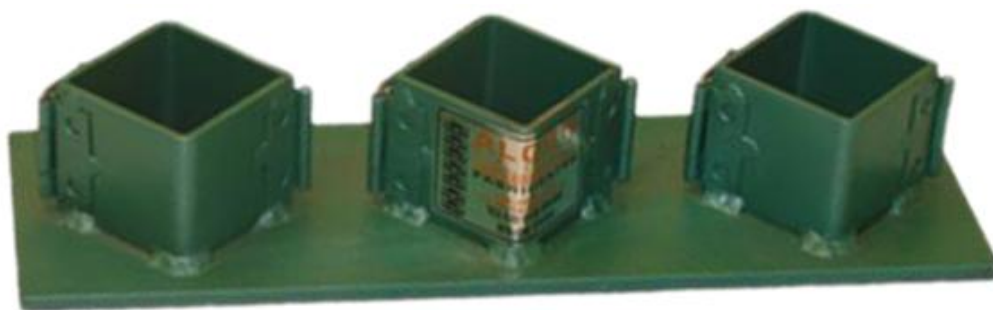


Figura 1. Moldes para cubo de mortero 50 mm x 50 mm x50 mm de la marca Alcon.

Los especímenes fueron sometidos a períodos de curado de 7, 14, 28 y 35 días en una cámara con condiciones controladas, manteniendo una temperatura constante de 25 ± 2 °C y una humedad relativa del $65 \pm 5\%$. Transcurrido el tiempo de curado, se realizaron ensayos de compresión axial en una prensa hidráulica CONTROLS (Figura 2).



Figura 2. Prensa de compresión de la marca CONTROLS.

La velocidad de carga se mantuvo constante en 1000 N/s, de acuerdo con las recomendaciones de la norma ASTM C109/C109M-21. La carga se aplicó hasta alcanzar la falla del material, definida como el punto en el que la muestra experimenta fractura.

2.2 Impresora 3D

La impresión 3D con cerámica es una alternativa mucho más rápida que los métodos tradicionales de fabricación de cerámica, reduciendo el tiempo de producción hasta en un 75% [20]. Esta nueva tecnología no solo ahorra tiempo, sino que también permite a los diseñadores una mayor libertad en sus procesos creativos y permite realizar cambios en sus diseños durante el proceso de producción.

Para la fabricación de las piezas cerámicas se utilizó una impresora 3D Tronxy Moore 1 (ver Figura 3), especializada en la extrusión de materiales viscosos. Esta impresora pertenece a la categoría de gama baja, lo que la convierte en una herramienta ideal y asequible para laboratorios y escuelas de todo el mundo. Las partes principales que conforman a la impresora son: (a) mesa desplazable en las coordenadas cartesianas X - Y , (b) mini-extrusor ubicado en la parte superior de la máquina, la cual funciona como el eje Z , (c) una interfaz de control, requerida para hacer los ajustes de configuración, y (d) un extrusor sin fin, el cual se encarga de suministrar el flujo de la pasta cerámica hacia la impresora de manera continua.

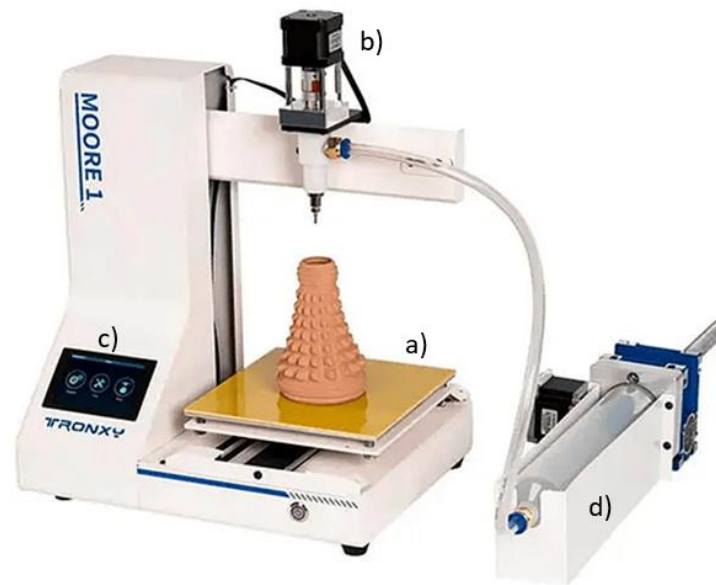


Figura 3. Impresora cerámica 3D, marca Tronxy.

Parte del proceso de investigación, consistió en realizar diversas pruebas para determinar los parámetros de impresión, tales como: altura de capa, velocidad de impresión y flujo de extrusión. Esta velocidad es crítica para controlar el flujo de salida de la pasta, evitando fluctuaciones que puedan comprometer la estabilidad de la impresión. En la sección siguiente, se analizan a detalle la influencia de estos parámetros en el proceso de impresión.

3. Resultados Experimentales

En esta sección, se estudian las diferentes composiciones de la pasta cerámica a través del análisis cualitativo de sus propiedades físicas y mecánicas. El diseño de las piezas fue realizado empleando el software SolidWorks, para la generación del g-code empleamos la aplicación Cura 15.05.4, esto permite el control automático de los motores a pasos y los extrusores.

3.1 Resistencia a la compresión

Como primer resultado, en la Figura 4 se muestra la evolución de la resistencia a la compresión en función del tiempo de curado para diferentes formulaciones (C0, C10, C20 y C30). Estas corresponden a mezclas con 0%, 10%, 20% y 30% de caolín, respectivamente. En cada formulación se agregó un 10% de cemento, 0.5% de bórax y el complemento pasta Ready-Mix. En la gráfica, se observa un aumento en la resistencia a la compresión a medida que avanza el tiempo de curado en todas las formulaciones. Esto es atribuible principalmente a la hidratación del cemento y la formación de fases cristalinas que actúan como refuerzo en la matriz [21].

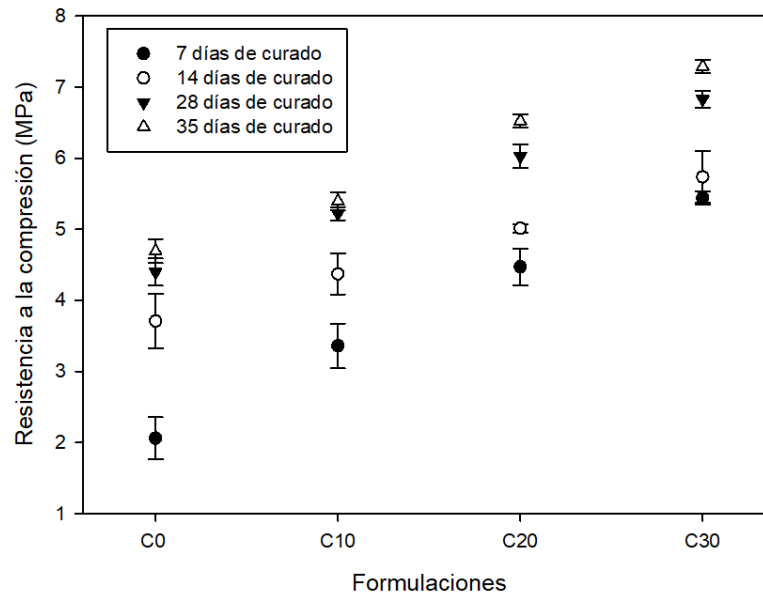


Figura 4. Evolución de la resistencia a la compresión de pastas cerámicas con diferentes porcentajes de caolín en función del tiempo de curado.

La formulación C0, sin caolín, mostró un incremento final del 114% en el valor de la resistencia: inició con 2.06 MPa a los 7 días de curado, hasta alcanzar un desempeño de 4.69 MPa a los 35 días de curado. Sin embargo, esta ganancia es inferior a las formulaciones realizadas con caolín, confirmando así la contribución significativa del agregado a la resistencia mecánica a la compresión.

El modelo matemático (MM) que describe el comportamiento de la resistencia a la compresión a 35 días de curado puede ser expresado como una línea recta. En particular, el ajuste por mínimos cuadrados queda expresado como:

$$y_R = 0.85 \times \text{formulación} + 3.6 \quad (1)$$

donde y_R queda expresado en MPa. Esta expresión es un modelo matemático que nos caracteriza el comportamiento lineal en la resistencia mecánica con respecto de la adición de caolín: conforme incrementamos el valor de caolín en 10%, se obtiene una ganancia de $0.85 \times 10\% = 8.5\%$. Lo cual es un indicador diferencial que nos permite predecir la ganancia para diferentes valores de caolín. Por ejemplo, para una formulación con 25% de caolín, se tendría un desempeño de 6.52 MPa.

En la Figura 5 se observa una tendencia de convergencia en el diferencial de la resistencia a la compresión conforme aumenta la modificación de la pasta cerámica.

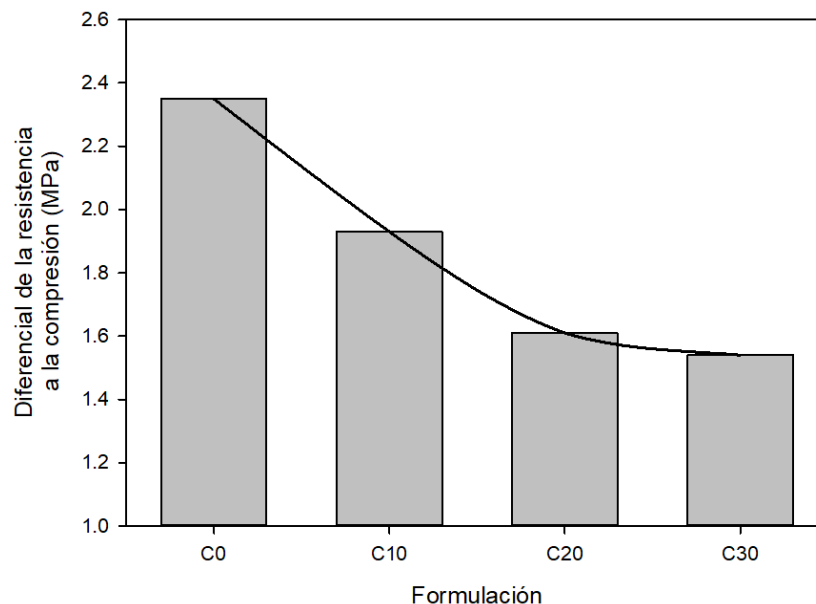


Figura 5. Resistencia a la compresión final-inicial, variando la formulación de la pasta cerámica.

En línea continua podemos apreciar que conforme incrementamos la cantidad de caolín (C10, C20 y C30), la curva tiende a un valor constante. Este comportamiento asintótico sugiere que las formulaciones alcanzan un estado de saturación mecánica. Para un porcentaje de caolín mayor al 30%, la resistencia mecánica no se incrementará. Esta homogeneización de las propiedades estructurales puede entenderse como una consecuencia de la limitación química del sistema: el cemento genera una cantidad finita de hidróxido de calcio Ca(OH)_2 , disponible para reaccionar con el caolín calcinado. Cuando la proporción de caolín es alta, el Ca(OH)_2 resulta insuficiente para activar la reacción puzolánica en el excedente de material. Como resultado, el caolín adicional no participa en la formación de fases cementicias y actúa como un componente inerte, sin contribuir al refuerzo mecánico.

3.2 Piezas con geometría simple

En la Figura 6 se muestran cubos de 25 mm, en cada una de sus caras, impresos con las distintas formulaciones de caolín: C0, C10, C20 y C30. En todos los casos, los parámetros de impresión se mantuvieron constantes. Esto permitió analizar visualmente el proceso final de la impresión y su morfología; reflejando la influencia de la composición de la pasta en la estabilidad dimensional y en la calidad del acabado superficial.



Figura 6. Variación de caolín en la pasta impresa: a) 0% caolín, b) 10% caolín, c) 20% caolín, y d) 30% caolín.

Las piezas mostradas en la Figura 6a y 6b exhiben un colapso parcial de las capas superiores, acompañado de deformaciones laterales debido a una insuficiente estabilidad estructural durante la deposición del material. En particular, en la Figura 6a se observa una alteración significativa en la alineación de las capas, mientras que en la Figura 6b la deformación es más homogénea, con un ensanchamiento en la base.

En contraste, las estructuras en la Figura 6c y 6d presentan una morfología más definida, con capas mejor alineadas y una mayor estabilidad geométrica. No obstante, la Figura 6d muestra ligeras irregularidades en las capas inferiores, lo que indica variaciones en la fluidez de la pasta durante la extrusión. De este análisis se aprecia que la Figura 6c (20% caolín) exhibe una buena definición estructural con líneas uniformes y bien definidas.

3.3 Piezas con geometría compleja

En la Figura 7a se muestra un recipiente hueco de arcilla (tipo *bowl*) fabricado mediante la impresión 3D con la pasta cerámica modificada. El objeto exhibe una estructura compleja, caracterizada por la disposición de curvas horizontales que son desplazadas en el eje vertical, lo cual genera un efecto visual de distorsión radial. Aunado a ello, las líneas de contorno presentan una buena definición, obteniendo una estructura sólida helicoidal.

Por otro lado, la estructura presentada en la Figura 7b evidencia una morfología distinta, caracterizada por la presencia de texturas más pronunciadas a lo largo de

la superficie, con ligeros colapsos superficiales. Dichas irregularidades pueden estar asociadas a diferencias en la viscosidad y tixotropía de la pasta C30. En trabajos futuros se analizará con más detalle las características reológicas y se investigará una mejora en las condiciones de deposición del material extruido.



Figura 7. a) Impresión 3D de un bowl cerámico utilizando la formulación C20 con 20% de caolín, b) impresión 3D de un recipiente utilizando la formulación C30 con 30% de caolín.

Los objetos fabricados demuestran que, al optimizar el proceso de manufactura (pasta cerámica + 3D), es posible construir geometrías tridimensionales y mejorar simultáneamente el acabado superficial. En particular, las geometrías curvas y complejas evidencian la capacidad de la impresión 3D en cerámica para generar formas intrincadas sin limitaciones de diseño. A pesar de que se identificaron irregularidades en las capas superiores e inferiores de las piezas impresas, se observó una alineación adecuada entre las capas, lo que indica que el proceso de impresión fue controlado de manera efectiva. Cabe destacar que las piezas impresas no requieren bases ni estructuras de soporte adicionales durante su fabricación.

4. Conclusiones

El presente estudio demuestra la viabilidad técnica de transformar una pasta comercial a base de resinas acrílicas (Ready-Mix) en un material apto para impresión 3D mediante la técnica de extrusión directa (DIW). La incorporación controlada de caolín, en proporciones de 10%, 20% y 30% en masa, junto con un contenido fijo de cemento (10%) y bórax (0.5%), modificó la reología del sistema favoreciendo la extrusión continua y la estabilidad geométrica durante la deposición capa por capa. Los ensayos de compresión evidenciaron un incremento significativo en la resistencia mecánica de las formulaciones con caolín respecto a la mezcla base, alcanzando valores de 6.5 MPa a los 35 días de curado para la formulación con 30% de caolín. Desde el punto de vista morfológico, las piezas impresas con mayor contenido de caolín (20% y 30%) mostraron una mejor definición de capas, menor

colapso estructural y mayor estabilidad dimensional, tanto en geometrías simples como en estructuras tridimensionales complejas. Como resultado práctico, se logró la impresión satisfactoria de un recipiente hueco tipo *bowl* con dimensiones aproximadas de 10 × 12 cm, el cual presentaba una textura superficial inducida por una distorsión radial controlada a lo largo del eje Z. En conjunto, la formulación con 20% de caolín representa un equilibrio óptimo entre viscosidad, cohesión interna y trabajabilidad.

La formulación de una pasta cerámica de bajo costo posiciona esta metodología como una alternativa accesible para la impresión 3D, haciéndola viable para su uso en instituciones educativas, laboratorios de investigación y en la manufactura artesanal.

Agradecimientos

Los autores expresan su gratitud al Dr. Daniel Edén Ramírez Arreola por la propuesta de utilizar una pasta comercial como base para el desarrollo del proyecto. El primer autor expresa su gratitud a la Secretaria de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SEICHTI), por el apoyo recibido para el desarrollo del trabajo de investigación a través de la beca de maestría (2023-000002-01NACF-00145).

Referencias

1. S. V. Murphy and A. Atala, "3D bioprinting of tissues and organs," *Nature Biotechnology*, vol. 32, no. 8, pp. 773–785, 2014. <https://doi.org/10.1038/nbt.2958>
2. N. Shahrubudin, T. C. Lee, and R. Ramlan, "An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications," *Procedia Manufacturing*, vol. 35, pp. 1286–1296, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>
3. T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Composites Part B: Engineering*, vol. 143, pp. 172–196, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
4. W. Xu et al., "Toward automated construction: The design-to-printing workflow for a robotic in-situ 3D printed house," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, pp. e01442, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01442>
5. C. W. Hull, "Apparatus for Production of Three-Dimensional object by stereolithography," US Patent 4,575,330, Mar. 11, 1986. [Google Scholar]
6. R. Jones et al., "RepRap – the replicating rapid prototyper," *Robotica*, vol. 29, no. 1, pp. 177–191, 2011. <https://doi.org/10.1017/S026357471000069X>
7. S. F. Iftekar, A. Aabid, A. Amir, and M. Baig, "Advancements and limitations in 3D printing materials and technologies: A critical review," *Polymers*, vol. 15, no. 11, pp. 2519, 2023. <https://doi.org/10.3390/polym15112519>
8. C. Schelly, G. Anzalone, B. Wijnen, and J. M. Pearce, "Open-source 3-D printing technologies for education: Bringing additive manufacturing to the classroom," *Journal of Visual Languages & Computing*, vol. 28, pp. 226–237, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jvlc.2015.01.004>

9. J. Jauk, H. Vašatko, L. Gosch, K. Ristoski, J. Füssl, and M. Stavric, "Coextrusion of Clay-Based Composites: Using a Multi-Material Approach to Achieve Gradient Porosity in 3D-Printed Ceramics," *Ceramics*, vol. 6, no. 4, pp. 2243–2255, 2023. <https://doi.org/10.3390/ceramics6040136>
10. V. G. Rocha, E. Saiz, I. S. Tirichenko, and E. García-Tuñón, "Direct ink writing advances in multi-material structures for a sustainable future," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 8, no. 31, pp. 15646–15657, 2020. <https://doi.org/10.1039/D0TA04181E>
11. Z. Chen et al., "3D printing of ceramics: A review," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 39, no. 4, pp. 661–687, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.013>
12. M. Z. Chaari, M. Abdelfatah, and C. Loreno, "A trial to convert a polymer FDM 3D printer to handle clay materials," *Springer Nature Applied Sciences*, vol. 4, no. 3, pp. 68, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42452-022-04937-w>
13. E. Romanczuk-Ruszk, B. Sztorch, D. Pakuła, E. Gabriel, K. Nowak, and R. E. Przekop, "3D printing ceramics-materials for direct extrusion process," *Ceramics*, vol. 6, no. 1, pp. 364–385, 2023. <https://doi.org/10.3390/ceramics6010022>
14. C. F. Revelo and H. A. Colorado, "3D printing of kaolinite clay ceramics using the Direct Ink Writing (DIW) technique," *Ceramics International*, vol. 44, no. 5, pp. 5673–5682, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.12.219>
15. E. Ordoñez, J. M. Gallego, and H. A. Colorado, "3D printing via the direct ink writing technique of ceramic pastes from typical formulations used in traditional ceramics industry," *Applied Clay Science*, vol. 182, pp. 105285, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105285>
16. J. Alonso Madrid, G. Sotorrío Ortega, J. Gorostiza Carabaño, N. O. E. Olsson, and J. A. Tenorio Ríos, "3D claying: 3D printing and recycling clay," *Crystals*, vol. 13, no. 3, pp. 375, 2023. <https://doi.org/10.3390/cryst13030375>
17. Panel Rey, "Compuesto ready mix estándar plus." Accedido: Jul. 12, 2024. [Link]
18. Panel Rey, "Hoja de seguridad de materiales." Accedido: Jul. 12, 2024. [Link]
19. Panel Rey, "Product declaration." Accedido: Jul. 12, 2024. [Link]
20. I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. New York, NY: Springer, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
21. R. Hay, J. Li, and K. Celik, "Phase evolution, micromechanical properties, and morphology of calcium (alumino)silicate hydrates C-(A-)S-H under carbonation," *Cement and Concrete Research*, vol. 152, pp. 106683, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106683>