

Capítulo 4. Producción de piezas de alúmina mediante manufactura aditiva

Juan Antonio Ham Serrano
María Isabel Montufar Rangel
Victor Lucino Padilla Estrada
Antonio Ramírez Gómez

Universidad Tecnológica de Tula Tepeji

Resumen

La manufactura aditiva (MA) tiene el potencial de ser una tecnología disruptiva en la fabricación de partes de material cerámico, ya que una de sus características es la libertad de forma, abriendo la posibilidad de fabricar partes cerámicas que por la complejidad de su geometría son difíciles de realizar utilizando los métodos convencionales de manufactura; además está la perspectiva de la utilización de los cerámicos en campos como el diseño mecánico, la electricidad y electrónica, la ingeniería biomédica y la aeronáutica, entre otras aplicaciones, debido a su resistencia a altas temperaturas, su dureza y estabilidad química, aunque por naturaleza los cerámicos son quebradizos y su procesamiento es complicado a pesar de utilizar la MA. El objetivo de este trabajo es determinar la mezcla, cantidad y tipo de materiales que se deben combinar para fabricar partes de alúmina utilizando la tecnología *binder jetting* de MA. La máquina Zcorp 306 plus en la que se realizarán las partes de alúmina es un equipo que fue diseñado y producido para trabajar con materiales hechos con un gran porcentaje de yeso o celulosa y un adhesivo líquido con el propósito de cohesionar las moléculas de los polvos, por lo que es importante determinar los tipos y porcentajes de polvos que se pueden emplear en la máquina mencionada para fabricar partes de alúmina. Por lo tanto, este trabajo se puede clasificar como investigación aplicada cuantitativa experimental.

Palabras clave: manufactura aditiva, alúmina.

Introducción

La manufactura aditiva (MA), también conocida como *3D printing* (3DP), *rapid prototyping* (RP) o *solid free form fabrication* (SFF) (Zocca et al., 2015), está revolucionando la forma de plantear la fabricación de prototipos y piezas funcionales; según ISO/ASTM 59200 (2015) p.1, MA es “el proceso de unir materiales para hacer objetos a partir de información de un modelo en tres dimensiones (3D), usualmente capa por capa, contrario a lo que se hace en las tecnologías de manufactura sustractiva”. Esto significa que una de las fortalezas de la MA es precisamente la libertad de forma, pues tampoco es necesario realizar herramentales complicados. Actualmente la capacidad de los equipos de MA no es para volúmenes de producción altos, y los costos de producción son elevados debido al precio del equipo y sus materias primas; en algunos casos, las piezas producidas deben ser sometidas a procesos de posproducción que mejoren los acabados y las propiedades mecánicas. La aplicación de la MA para producir partes funcionales y conceptuales es aceptada en áreas como la aeronáutica, medicina, automotriz y alimentos. Se puede utilizar en la reparación de piezas metálicas sin tener que hacerlas nuevas. Las piezas obtenidas son híbridas, ya que los acabados de dichas piezas se harán utilizando manufactura convencional. Otra aplicación de la manufactura aditiva es la generación de piezas de recambio reduciendo los tiempos de entrega, los paros de máquina y el inventario de refacciones.

El presente estudio está organizado de la siguiente manera, en el marco de referencia teórica, se da una explicación general del proceso de producción de partes utilizando la MA, mientras que en el apartado de Clasificación de tecnologías de MA se describe de forma breve cada una de ellas. En la parte de Cerámicos avanzados, se explica el término cerámicos avanzados y algunos de los materiales que se pueden incluir en esta clasificación.

Marco de referencia teórica

El concepto de fabricar una pieza directamente a partir de un archivo en 3D producido por un software CAD parece muy sencillo, ya que sólo deben observarse las características de los materiales a utilizar, así como los parámetros a controlar del equipo que se emplea. La pieza se producirá capa por capa, la forma en que los materiales se unirán en cada una dependerá de la tecnología del equipo, el grosor de la capa determinará la calidad de la pieza y su aproximación al modelo real. De estos factores dependen las características de la pieza producida como dureza, porosidad, exactitud, desempeño mecánico, tiempo y costo de fabricación.

Para poder obtener una pieza mediante MA, se deben observar las siguientes etapas de acuerdo con Gibson et al. (2021).

1. CAD. Se debe utilizar algún software CAD para generar la descripción en 3D de la geometría de un modelo. Para obtener los modelos en 3D, es posible también utilizar equipos como escáner.
2. Convertir el modelo 3D en un archivo STL. Un archivo STL es un archivo en el que se describe la superficie de un modelo en 3D mediante triángulos. Entre mayor sea la cantidad de triángulos, mejor será la representación del objeto.

El término STL es una abreviación de stereolithography que fue uno de los primeros sistemas de manufactura que se desarrollaron. Este archivo puede almacenar la información en formato ASCII que contiene las coordenadas de los vértices de los triángulos o en formato binario en el que cada triángulo se representa por doce números de punto flotante de 32 bits. El archivo STL es la base para que se definan las capas o layers con las que se construirá el objeto.

3. Transferir el archivo STL a la máquina de MA para su preparación. Se ajusta el tamaño del modelo, ubicación en el área de trabajo y orientación.
4. Preparar la máquina de MA. Hacer ajustes a parámetros de construcción: restricciones de material, grosor de la capa, temperaturas, tiempo y dimensiones.
5. Construir el modelo. Esta etapa se desarrolla por el software y la máquina de MA de forma automática, sólo es necesario monitorear que no falte material o energía eléctrica, que no haya fallas en el software o que la pieza se esté construyendo de forma inadecuada.
6. Extraer la pieza. Dependiendo del tipo de máquina de MA utilizada se debe observar que la temperatura de la pieza fabricada esté lo más baja posible para que pueda ser manipulada, que la pieza sea resistente al proceso de extracción.
7. Posproceso. Las piezas extraídas pueden necesitar de labores de limpieza, acabado o remoción de elementos de soporte, pintado, infiltración o algún proceso o tratamiento específico.
8. Aplicación. Finalmente, las piezas están en condiciones de ser utilizadas.

Clasificación de las tecnologías de MA

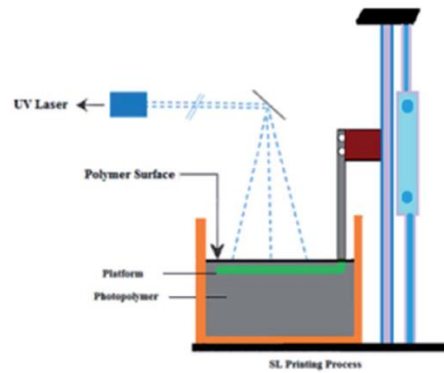
La norma ISO/ASTM 52900 (2015) clasificó las distintas tecnologías de MA en siete categorías que a continuación se describen en forma general.

1. Tina de fotopolimerización (*VAT Photopolimerization*)

Se refiere al proceso de MA en el que un líquido fotopolimérico contenido en una tina es curado selectivamente por luz activando la polimerización (véase figura 1).

Figura 1

Tina de fotopolimerización



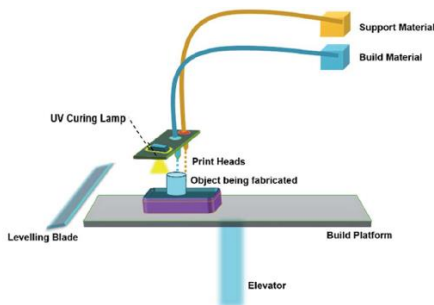
Fuente: Sireesha et al. (2018).

2. Inyección de Material (*Material Jetting*)

Es un proceso de MA en el que gotas del material de construcción se depositan selectivamente (véase figura 2).

Figura 2

Inyección de Material



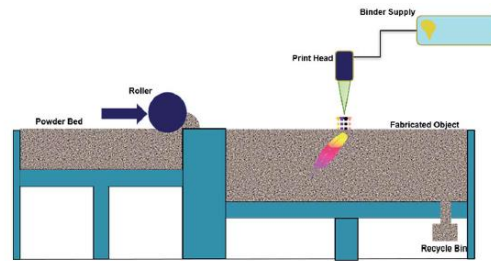
Fuente: Sireesha et al. (2018).

3. Inyección de aglutinante (*Binder Jetting*)

Es un proceso de MA en el que un agente aglutinante se deposita selectivamente para unir polvos de materiales (véase figura 3).

Figura 3

Inyección de aglutinante



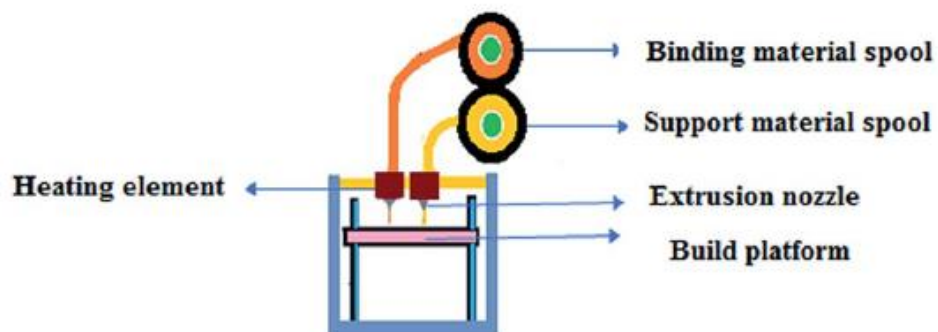
Fuente: Sireesha et al. (2018).

4. Inyección de Material (Fused Deposition Modelling)

Es un proceso de MA en que el material es selectivamente dispensado mediante una boquilla u orificio (véase figura 4).

Figura 4

Inyección de Material



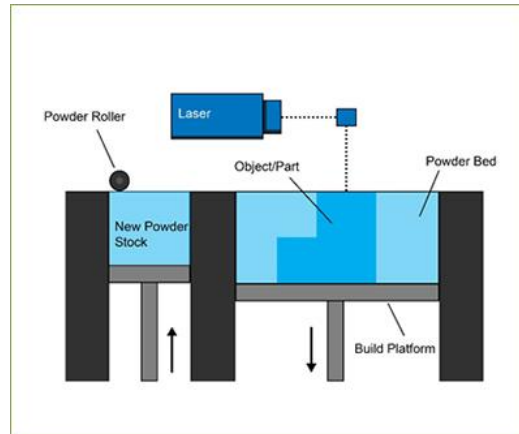
Fuente: Sireesha et al. (2018).

5. Fusión por cama de polvos (*Powder Bed fusion*)

Es un proceso de MA en el que la energía térmica selectivamente funde regiones de una cama de polvo (véase figura 5).

Figura 5

Fusión por cama de polvos



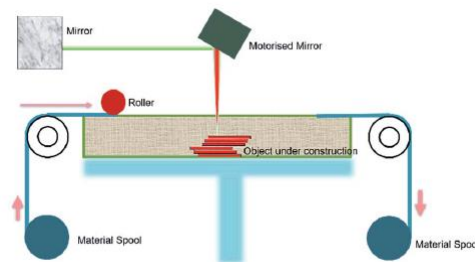
Fuente: Loughborough University (2021).

6. Laminación (Sheet lamination)

Es un proceso de MA en el que las hojas de materiales son unidas para formar un objeto (véase figura 6).

Figura 6

Laminación



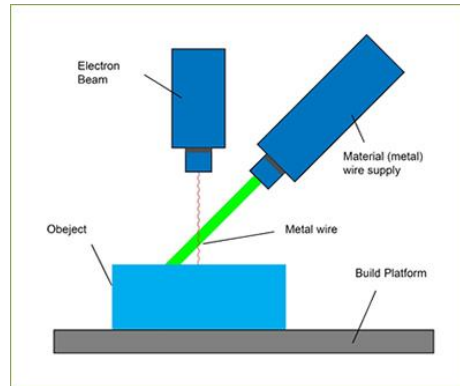
Fuente: Sireesha et al. (2018).

7. Deposición Directa de Energía (*Directed energy deposition*)

Es un proceso de MA en el que la energía térmica dirigida se utiliza para fundir materiales según se depositen (véase figura 7).

Figura 7

Deposición Directa de Energía



Fuente: Loughborough University (2021).

Cerámicos avanzados

El término cerámicos avanzados fue acuñado en la década de 1970 con el propósito de designar a una nueva categoría de materiales de ingeniería que serían utilizados en las nuevas tecnologías del siglo XXI. En el caso de Japón, se le conoce como *fine ceramics*, en Estados Unidos como cerámicos técnicos o avanzados, mientras que en Reino Unido se subdividen en cerámicos funcionales: aquellos aplicados en la industria electrónica y cerámicos estructurales que son aquellos que realizan un trabajo mecánico (Matizamhuka, 2018).

De acuerdo con Du et al. (2017), entre los materiales cerámicos avanzados están la alúmina, el zirconio y el carburo de silicio, que se caracterizan por poseer una gran dureza, resistencia al desgaste, al calor, a la corrosión y son biocompatibles.

Método

Xinyuan et al. (2019) mencionan que las tecnologías de MA antes mencionadas son capaces de producir partes cerámicas; sin embargo, la tecnología *binder jetting* tiene las siguientes ventajas en comparación con otras tecnologías: es más fácil preparar polvos cerámicos que hojas o filamentos cerámicos, se tienen más opciones para aplicaciones específicas, además

de que es posible agregar color a las partes producidas. También explican que son cinco etapas que se deben seguir para obtener piezas cerámicas mediante esta tecnología.

1. Preparación de polvos.
2. Fabricación de una parte en “verde” utilizando una máquina de MA y con ayuda de software de diseño asistido por computadora (CAD).
3. Curado de la pieza en la que se somete a una temperatura de aproximadamente 200 °C para activar el binder y la pieza sea más resistente.
4. Eliminación del binder a una temperatura más alta; en muchos casos, a las piezas en esta etapa se les conoce como preformas.
5. Postratamiento que puede ser un proceso de sinterizado.

Este trabajo cubre la determinación de polvos que se utilizarán en el equipo de MA, por lo que se deberán identificar los tipos de polvos y los porcentajes que permitan la fabricación de partes de alúmina.

Gonzalez et al. (2016) obtuvieron piezas de alúmina con una pureza de 60 a 85% de material para piezas resistentes a la temperatura. Se utilizaron polvos de alúmina con distintos tamaños del grano, se hicieron ensayos donde el grosor de la capa se ajustaba al tamaño de grano. En otros ensayos el grosor fue la mitad del tamaño del grano mientras que en otros el grosor de la capa fue el doble que el tamaño del grano, las piezas terminadas se colocaron en un horno a 195 °C para eliminar el adhesivo. La temperatura de sinterización de las piezas fue de 1600 °C, con un rango entre 2 y 16 horas. Resultaron piezas con reducción dimensional de 10.27% en comparación con las piezas en “verde”; piezas con menor tiempo de sinterizado presentaron formación de poros, aquellas cuyo tiempo de sinterizado fue mayor hubo menos poros y unión entre partículas.

Resultados de la investigación

Esta investigación se llevó a cabo bajo el siguiente plan de trabajo.

Tabla 1

Plan de trabajo

Actividades	Tiempo en semanas												Observaciones
	Primer mes				Segundo mes				Tercer mes				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Revisión bibliográfica													
Elaboración de pastillas 80-20												Preparación manual utilizando molde	
Elaboración de pastillas 90-10												Preparación manual utilizando molde	
Elaboración de pastillas 100												Preparación manual utilizando molde	
Proceso de secado para desmoldar												Temperatura ambiente	
Determinación de parámetros para TGA													
Análisis termogravimétrico (TGA)													
Interpretación de resultados													

Se fabricaron piezas manualmente, utilizando los siguientes materiales: alúmina y polvo Zp 131. El polvo Zp 131 es un polvo utilizado por las máquinas que se desarrollaron bajo la marca de Zcorp, las características del polvo según la hoja de datos de seguridad del material son las siguientes.

Tabla 2

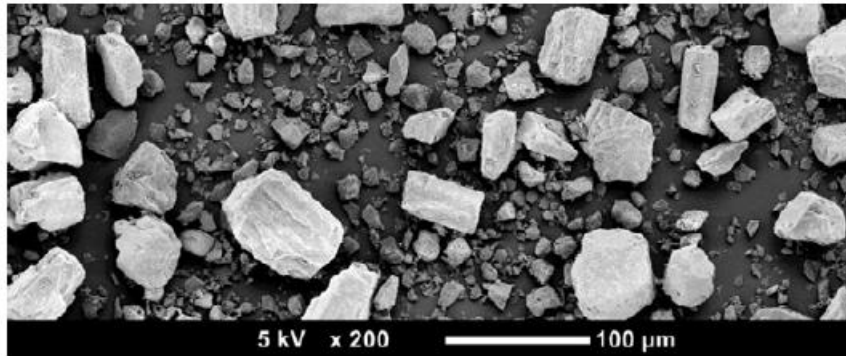
Componentes del polvo Zp131

Ingredientes	% aproximado por peso
Yeso con silica cristalina < 1%	50 - 95
Polímero de Vinilo	2 - 20
Carbohidratos	1 - 20
Sal de sulfato	1 - 20

El polvo Zp 131 de acuerdo con Budding y Vaneker (2013), presenta un tamaño de partícula $16.33\text{ }\mu\text{m}$ en promedio, una densidad de 1.373 g/cm^3 y dos tipos de forma de grano descritas en la figura 8.

Figura 8

Tamaño y forma de grano del polvo Zp 131



Fuente: Budding y Vaneker (2013).

La alúmina utilizada tenía un tamaño medio de $0.4\text{ }\mu\text{m}$ y un área de superficie específica de $8.5\text{ m}^2/\text{g}$, según la hoja de datos del fabricante. Se mezclaron manualmente los dos tipos de polvo, Zp 131 y alúmina; posteriormente, se agregó aglutinante o binder Zb 60 cuyas características, según Zañartu (2009), son las que se muestran a continuación.

Tabla 3*Componentes del aglutinante Zb 60*

Descripción	% aproximado por peso
Humectante 1	<10
Humectante 2	<8
Polímero	< 4
Agua	85 - 95

El *binder* es un elemento que permite unir las moléculas de los polvos, además de proporcionar más resistencia, lo que posibilita un mejor manejo de la pieza en un postratamiento que puede ser un acabado, un infiltrado o un sinterizado.

Porciones de la mezcla hecha con diferentes concentraciones de alúmina, *binder* y polvo Zp 131, se colocaron manualmente en orificios de un molde de aluminio, de acuerdo con la tabla 4.

Tabla 4*Composición de piezas de alúmina*

Alúmina		Polvo ZP131		Binder	Núm. de pastillas
% en peso	Gramos	%	Gramos	ml	Piezas
80	4	20	1	2.5	6
90	4.5	10	0.5	2.5	6
100	5	0	0	2.5	6

En las siguientes imágenes, se describen algunas de las piezas producidas con diferentes porcentajes de polvos (véase figura 9).

Figura 9a

Piezas con 80% de alúmina y 20% de Zp 131

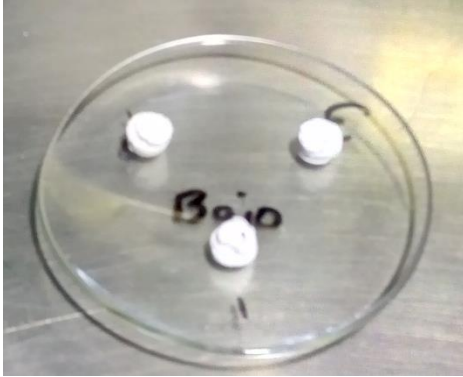


Figura 9b.

Piezas con 100% de alúmina



Las dimensiones de las piezas fueron de $\frac{1}{2}$ " de diámetro y $\frac{1}{4}$ " de espesor; la mezcla de polvos y binder después de colocarse en los orificios del molde de aluminio, se dejaron secar a temperatura ambiente para que se pudieran extraer. La consistencia mostrada en las piezas con polvo Zp 131 fue mejor que las que sólo contenían alúmina, además estas últimas eran más frágiles.

De estas piezas se obtuvieron muestras para ser analizadas en un equipo SETSYS Evolution TGA-DTA/DSC SETARAM con el propósito de verificar, mediante un análisis termogravimétrico (TGA), la eliminación del binder. El programa de la rampa de temperaturas utilizado es similar al reportado por Yang *et al.* (2018), en el que se incrementó la temperatura 5 °C por minuto a partir de la temperatura ambiente hasta alcanzar los 600 °C en una atmósfera de nitrógeno, con los resultados descritos en los siguientes termogramas (véase figuras 10, 11 y 12).

Figura 10
Alúmina al 80%

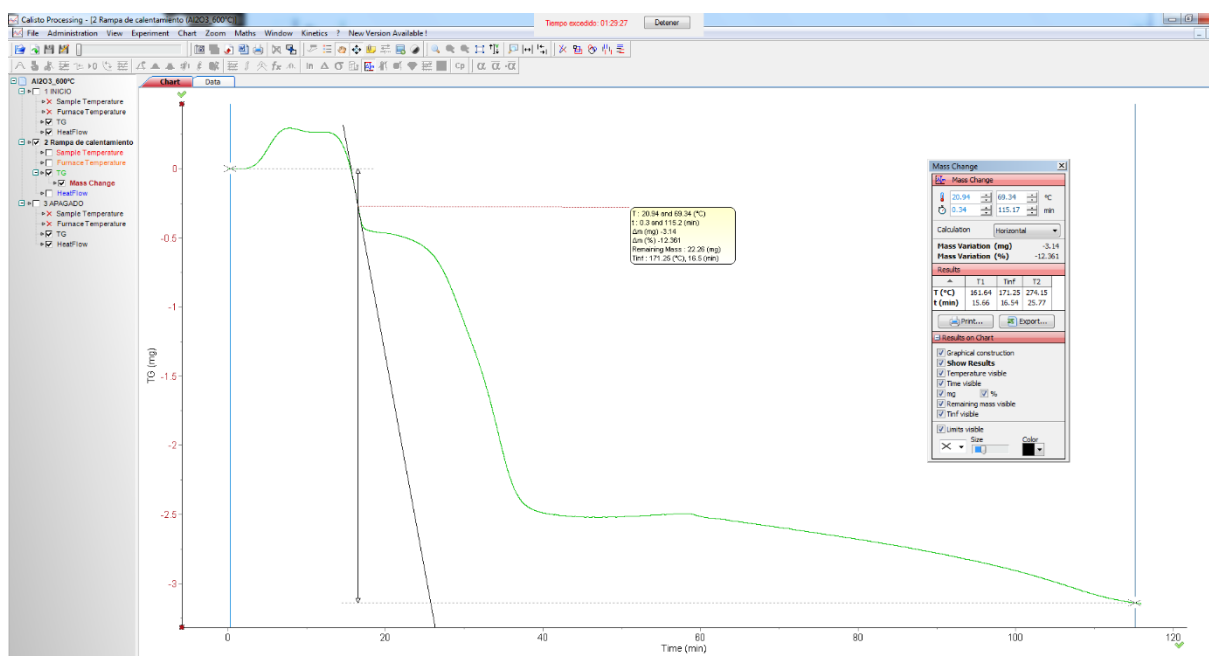


Figura 11
Alúmina al 90%

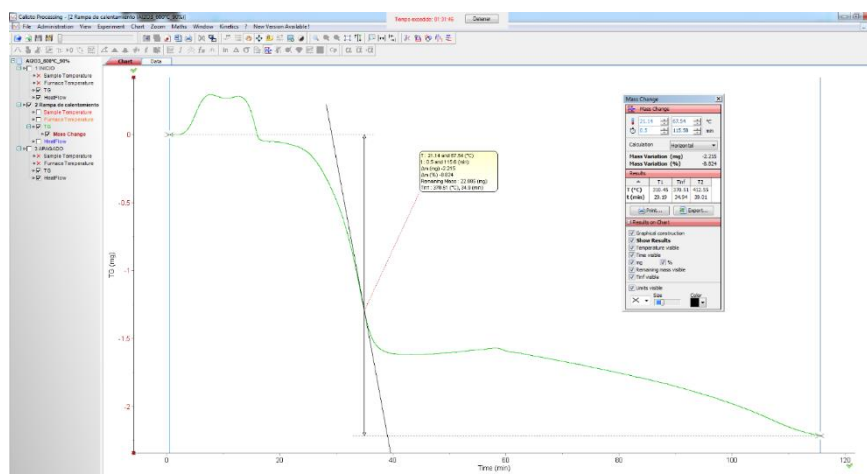
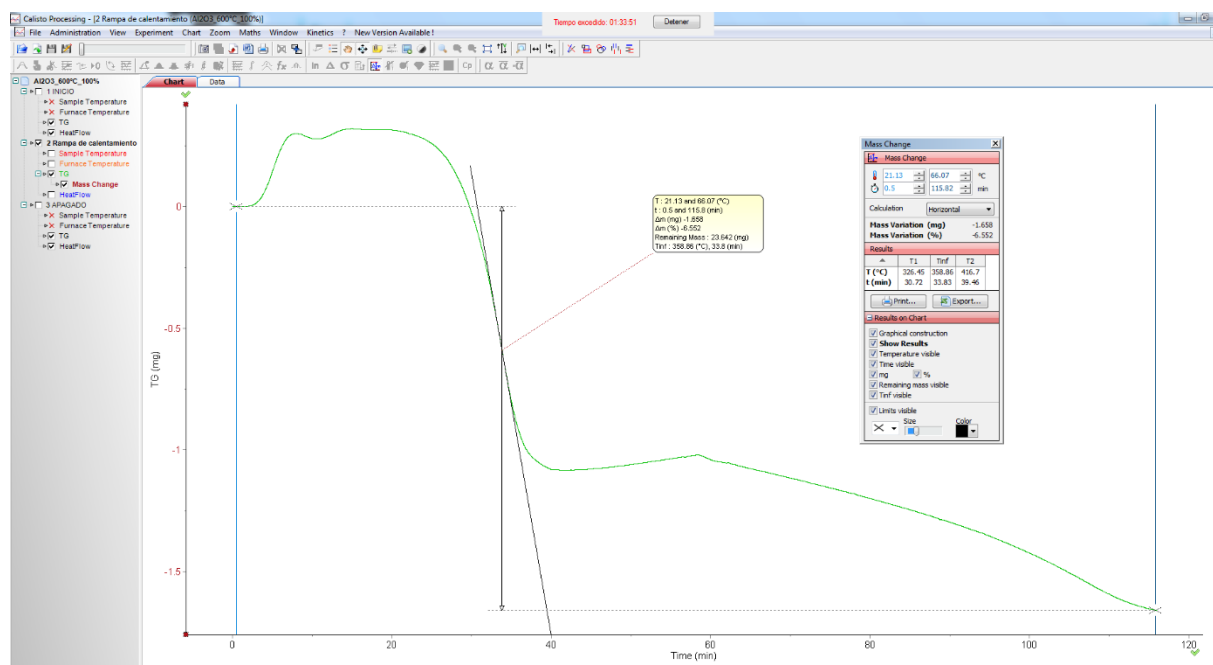


Figura 12.
Alúmina al 100%



El resumen de los resultados se presenta en la tabla 5.

Tabla 5
Resultados análisis TGA

	Muestra 80% alúmina	Muestra 90% alúmina	100 % de alúmina
Peso inicial de la muestra mg	25.4	25.1	25.3
Tiempo de inflexión minutos	20.94	21.14	21.13
Temperatura de inflexión grados centígrados	69.34	67.54	66.07
Cambio de peso mg	-3.14	-2.215	-1.658

Propuesta o aportación

Se observa en el análisis TGA que en la primera etapa de la prueba efectivamente hay una pérdida de masa en todas las muestras que se puede atribuir a la evaporación del agua, que es el principal elemento del aglutinante; mientras que, en la segunda etapa, se pierden el resto

de los componentes del binder. Para el caso de las piezas que serán utilizadas en aplicaciones médicas, es importante su eliminación.

Los resultados obtenidos de las muestras que se desarrollaron indican coherencia con lo mencionado en la literatura consultada en cuanto a la eliminación, a una cierta temperatura, del binder o adhesivo: en este caso de la mezcla de alúmina, polvo ZP 131 y binder ZB60. Estos últimos materiales diseñados para trabajar con la máquina Zcorp 306 plus. Según las curvas generadas en los termogramas realizados con diferentes tipos de muestra, de forma general se observa que después de 21.07 minutos en promedio y una temperatura promedio de 67.65 °C, la muestra empieza a experimentar una pérdida de masa atribuible a la evaporación del agua contenida en el binder. Por otro lado, la consistencia de las piezas resultantes en algunos casos fue muy frágil debido al contenido de humedad que presentaban, por lo que fue necesario introducirlas en un horno a una temperatura de 50 °C durante 30 minutos para secarlas y poder manipularlas. Lo anterior confirma lo que Gonzalez et al. (2016) obtuvieron en su ensayo, en el que las piezas terminadas se colocaron en un horno a 195 °C para eliminar el adhesivo o binder, mientras que Deckers, Vleugels y Kruth (2014) mediante un tratamiento térmico retiraron el adhesivo. Ferrage et al. (2017) también retiraron el binder utilizando una temperatura entre 150 y 500 °C, dependiendo del tipo de binder. Asimismo, se debe tomar en cuenta lo descrito por Leite et al. (2020), quienes utilizaron la tecnología *lasered engineered net shaping* (LENS) para generar piezas con materiales cerámicos. De esta revisión se encontró que los cerámicos más utilizados fueron alúmina, óxido de zirconio y carburo de silicio, en donde el tamaño y la forma del grano de los polvos fueron muy similares. Zhang et al. (2001) utilizaron como aglutinante polivinilo butiral al 7% en peso; mientras que Susmita (2001) produjo partes cerámicas empleando polipropileno como adhesivo y polvos de mullita, óxido de titanio y sílice fundido.

Conclusiones

Los resultados no son suficientes para determinar la proporción de polvos que se tienen que mezclar para obtener piezas cerámicas utilizando la tecnología *binder jetting*. Es necesario realizar pruebas utilizando únicamente alúmina y un binder que no necesariamente sea el que ha sido diseñado para trabajar con los equipos que comercialmente están disponibles. Para Deckers et al. (2014), es posible utilizar ácido esteárico o cera carnauba. También es necesario experimentar con alúmina de diferentes tamaños de grano. Otros aspectos a considerar son la saturación del binder, el grosor de la capa y su influencia en las propiedades de la pieza, la orientación de la pieza en el proceso de fabricación, el proceso de extracción de las piezas, el control en la formación de poros y mejorar los acabados superficiales, así como la densificación.

Referencias

- Budding, A., & Vaneker, T. (2013). New Strategies for Powder Compaction in Powder - Based Rapid Prototyping Techniques. *The Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM), Procedia CIRP* 6, 527-532.
- Chen, Zhang Wei, Zhiyong, Li, Junjie, Li, Chengbo, Liu, Changshi, Lao, Yuelong, Fu, Changyong, Liu, Yang, Li, Pei, Wang, & Yi, He (2018). 3D printing of ceramics: A review. *Journal of the European Ceramic Society*, 39(4).
- Deckers, J., Vleugels, J., & Kruth, J. P. (2014). Additive Manufacturing of Ceramics. *Review, Journal of Ceramic Science and Technology*, 5(4), 245-260.
- Du, W., Ren, X., Ma, C., & Pei, Z. (2017). Binder jetting additive manufacturing of ceramics: A literature review. In *Proceedings of the ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Tampa, Florida, Estados Unidos, 3-9 noviembre.

- Ferrage, L., Bertrand, G., Lenormand, P., Grossin, D., & Ben-Nissan, B. (2017). A review of the additive manufacturing (3DP) of bioceramics: alumina, zirconia (PSZ) and hydroxyapatite. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 53(1), 11-20. ISSN 2510-1560.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). *Additive Manufacturing Technologies*, third edition. Switzerland: Springer Nature Switzerland.
- Gonzalez, J. A., Mireles, J., Lin, Y., & Wicker, R. B. (2016). Characterization of ceramic components fabricated using binder jetting additive manufacturing technology. *Ceramics International*, 42(9), 10559-10564.
- ISO/ASTM 52900 (2015). *(E) Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology*.
- Leite de Camargo, I., Parreira, J., Erbereli, R., Teixeira, R., Da Silva, I. B., & Fortulan, C. A. (2020). An Overview of Laser Engineered Net Shaping of Ceramics. *Revista Materia*, 2(1).
- Loughborough University (julio/agosto 2021). *About Additive Manufacturing*. Recuperado de <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/>.
- Matizamhuka, W. R. (2018). Advanced ceramics — The new frontier in modern-day technology. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, part I, 118, 7-764.
- Niu, F., Wu, D., Ma, G., & Zhang, B. (2015). Additive manufacturing of ceramic structures by laser engineered net shaping. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 28, 1117–1122 (2015). <https://doi.org/10.3901/CJME.2015.0608.078>
- Sireesha, M., Lee, J., Kranthi, A. S., Jagadeesh, Kee, B., & Ramakrishna, S. (2018). A review on additive manufacturing and its way into the oil and gas industry. *Journal of the Real Society of Chemistry*, 18, 22460-22468.
- Susmita, B., Bandyopadhyay, A., & Onagoruwa, S. (2001). *Fused deposition of ceramics (FDC) and composites*, 224-231. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/266333922>.

- Xinyuan, L., Fang, Y., Laifei, C., Shangwu, F., & Yongsheng, L. (2019). Binder jetting of ceramics: Powders, binders, printing parameters, equipment, and post-treatment. *Ceramics International*, 45, 12609-12624.
- Yang, Q., Li, H., Zhai, Y., Li, X., & Zhang, P. (2018). The synthesis of epoxy resin coated Al_2O_3 composites for selective laser sintering 3D printing. *Rapid Prototyping Journal*, 24(6).
- Zañartu, G. J. (2009). *Caracterización de propiedades mecánicas de material particulado consolidado a través de un sistema de prototipado rápido experimental*. Tesis de la Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería.
- Zhang, Y., He, X., Han, J., Du, S., & Zhang, J. (2001). Al_2O_3 Ceramics Preparation by LOM (Laminated Object Manufacturing). *International Journal of Advanced Manufacturing and Technology*, 17, 531-534.
- Zocca, A., Colombo, P., Gomes, C. M., & Gunster, J. (2015). Additive Manufacturing of Ceramics: Issues, Potentialities, and Opportunities. *Journal of the American Ceramic Society*, 98(7), 1983-2001.