



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior

ANÁLISIS MECÁNICO DE PROBETAS FABRICADAS EN FDM CON BASE CERÁMICA

Alumno: Sergio Ruiz Lorente

Tutor: Prof. D. Nombre Profesor

Cotutor: Prof. D. Juan Salvador Bueno Rodríguez

Dpto: Ingeniería de los Procesos de Fabricación
Ingeniería Química (Cotutor)

Junio 2023



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Mecánica

Don D. ALBERTO GARCÍA COLLADO y D. Juan Salvador Bueno Rodríguez,
tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: Análisis mecánico de probetas
fabricadas en FDM con base cerámica, que presenta Sergio Ruiz Lorente,
autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica
Superior de Jaén.

Jaén, JUNIO 2023

El alumno:

Una firma manuscrita en tinta negra que parece ser "Sergio Ruiz Lorente".

El tutor:

Sergio Ruiz Lorente

Alberto García Collado
Juan Salvador Bueno Rodríguez

Resumen

Para la realización de este proyecto vamos a usar tecnologías muy novedosas y que están en continua evolución como es la fabricación de probetas con base cerámica mediante impresión 3D.

La creación de probetas cerámicas mediante impresión FDM (Fused Deposition Modeling) es un proceso que combina la tecnología de fabricación aditiva con la capacidad de transformar materiales cerámicos en formas tridimensionales.

En primer lugar, la impresión FDM utiliza una boquilla o extrusor que deposita capas sucesivas de material cerámico en estado semilíquido o viscoso. Estas capas se solidifican rápidamente a medida que se enfrían, lo que permite construir gradualmente la estructura deseada.

Para los parámetros usados en la impresión de estas probetas, hemos partido de otra investigación de un compañero donde expuso cuales son los mejores parámetros para la impresión con este material.

Después de la impresión, las probetas cerámicas impresas en 3D deben someterse a un proceso de sinterizado para lograr la consolidación y la obtención de las propiedades cerámicas deseadas. El sinterizado es un tratamiento térmico en el que las partículas cerámicas se calientan a una temperatura lo suficientemente alta como para que se produzca una difusión de átomos y una reducción de los poros entre las partículas.

Gran parte del tiempo y el objetivo de este proyecto ha sido encontrar el sinterizado que nos de las mejores características mecánicas para ello, hemos estado usando diferentes sinterizados en nuestras probetas y posteriormente hemos obtenido sus características mecánicas mediante un ensayo de flexión en tres puntos.

A parte de todo esto, hemos estudiado tanto la densidad como la porosidad de cada una de estas probetas con los diferentes sinterizados.

En resumen, después de la realización de este proyecto, hemos podido obtener el sinterizado más óptimo para nuestras probetas de alúmina. El uso de este material junto a la impresión FDM es una revolución ya que, podemos fabricar piezas con diferente geometría a una gran velocidad y obtener las propiedades características de los materiales cerámicos.

Abstract

To carry out this project we are going to use very new technologies that are in continuous evolution, such as the manufacture of ceramic-based specimens by 3D printing.

The creation of ceramic specimens by FDM (Fused Deposition Modeling) printing is a process that combines additive manufacturing technology with the ability to transform ceramic materials into three-dimensional shapes.

First, FDM printing uses a nozzle or extruder that deposits successive layers of ceramic material in a semi-liquid or viscous state. These layers solidify rapidly as they cool, allowing the desired structure to be built up gradually.

For the parameters used in the printing of these specimens, we have taken another colleague's research as a starting point, in which he explained the best parameters for printing with this material.

After printing, the 3D printed ceramic specimens must undergo a sintering process to achieve consolidation and the desired ceramic properties. Sintering is a heat treatment in which ceramic particles are heated to a temperature high enough to cause a diffusion of atoms and a reduction of the pores between the particles.

Much of the time and the objective of this project has been to find the sintering that gives us the best mechanical characteristics for this, we have been using different sinterings in our specimens and subsequently we have obtained their mechanical characteristics by means of a three-point bending test.

Apart from all this, we have studied both the density and the porosity of each of these specimens with the different sinterings.

In summary, after carrying out this project, we have been able to obtain the most optimal sintering for our alumina specimens. The use of this material together with FDM printing is a revolution as we can manufacture parts with different geometries at a high speed and obtain the characteristic properties of ceramic materials.

Índice

Resumen.....	3
Abstract	4
1. Estado del arte.....	8
1.1 Ventajas de esta tecnología.....	9
1.2 Uso de materiales cerámicos en la impresión FDM	11
1.3 Tipos de fabricación aditiva para materiales cerámicos.....	12
1.4 Diferentes componentes de las cerámicas técnicas	17
1.4.1 Óxidos.....	17
1.4.2 No óxidos.....	20
2. Objetivos.....	21
3. Maquinaria, utensilios y modo de empleo.....	22
3.1. Equipamiento	22
3.1.1. Impresora FDM	22
3.1.2 Maquina baño maría	23
3.1.3 Horno	24
3.1.4. Máquina de ensayos.....	26
3.1.4. Balanza.....	27
3.1.5. Bomba de vacío y desecador	28
3.2. Material	29
3.3. Software	30
3.3.1. Diseño de probeta.....	30
3.3.2. Laminador	30
3.3.3. Estudio estadístico.....	31
4. Probetas	32
4.1. Tipos de Probetas	32
4.1.1. Probetas para flexión	32
5. ENSAYOS Y TRATAMIENTO DE RESULTADOS	38
5.1. Flexión	38
5.1.1 Descripción de ensayo.....	38
5.1.2 Resultados de los ensayos y tratamiento estadístico.	40
5.2. Densidad	42
5.2.1. Descripción de ensayo.....	43
5.2.2 Resultados de los ensayos y tratamiento estadístico.	45

5.3 Comparación entre los ensayos de resistencia a flexión y densidad	48
6. Conclusiones	51
Referencias	53
Tablas de resultados	55
Tabla de resultados 1. Ensayo de flexión.	55
Tabla de resultados 2. Ensayo de densidad.	56
Tabla de resultados 3. Ensayo de porosidad.	56

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Técnica de sinterización por láser selectiva [7]	12
Ilustración 2. Técnica de fusión por haz de electrones [8]	13
Ilustración 3. Partes de la impresora FDM	14
Ilustración 4. Pieza realizada por estereolitografía [9]	15
Ilustración 5. Pieza realizada por deposición líquida de material [10]	15
Ilustración 6. Técnica binder Jetting [10]	16
Ilustración 7. Pieza realizada con circona	19
Ilustración 8. Impresora FDM utilizada	22
Ilustración 9. Máquina usada para el baño de acetona	23
Ilustración 10. Horno de altas temperaturas utilizado	24
Ilustración 11. Maquinaria de ensayos de resistencia a flexión	26
Ilustración 12. Balanza utilizada	27
Ilustración 13. Bomba de vacío y desecador utilizados	28
Ilustración 14. Propiedades de la Alúmina	29
Ilustración 15. Diseño de probetas	30
Ilustración 16. Gráfico de temperatura respecto a tiempo total	37
Ilustración 17. Colocación de probeta en f3p	38
Ilustración 18. Reacciones producidas en ensayo f3p	38
Ilustración 19. Tratamiento estadístico para R.Flexión	40
Ilustración 20. Gráfica representativa de la R.Flexión según el tipo de sinterizado	41
Ilustración 21. Proceso de pesada en seco	43
Ilustración 22. Proceso de saturación de aire	44
Ilustración 23. Proceso pesado hidrostático	44
Ilustración 24. Tratamiento estadístico para densidad	45
Ilustración 25. Gráfica representativa de la densidad según el tipo de sinterizado	46
Ilustración 26. Tratamiento estadístico para la porosidad	47
Ilustración 27. Gráfica representativa de la porosidad según el tipo de sinterizado	47
Ilustración 28. Gráfica representativa de la R.Flexión respecto a la densidad para el tipo de sinterizado A	48
Ilustración 29. Gráfica representativa de la R.Flexión respecto a la densidad para el tipo de sinterizado B	48
Ilustración 30. Gráfica representativa de la R.Flexión respecto a la densidad para el tipo de sinterizado C	49
Ilustración 31. Gráfica representativa de la R.Flexión respecto a la densidad para el tipo de sinterizado D	49
Ilustración 32. Gráfica representativa de la R.Flexión respecto a la densidad para el tipo de sinterizado E	50
Ilustración 33. Gráfica representativa de la R.Flexión respecto a la densidad para el tipo de sinterizado F	50

1. Estado del arte

La fabricación aditiva (FDM, por sus siglas en inglés) o impresión 3D se ha convertido en una tecnología muy popular en la última década. Esta tecnología implica la extrusión de un material termoplástico a través de una boquilla a una temperatura específica, creando capas finas que se apilan para crear un objeto en 3D. El proceso es relativamente rápido y permite la creación de objetos con formas y tamaños complejos.

La impresión 3D FDM (Fused Deposition Modeling) es un proceso de fabricación aditiva que utiliza un filamento termoplástico para construir objetos capa por capa. Aunque la tecnología FDM es ampliamente utilizada para imprimir objetos de plástico, también es posible utilizarla con materiales cerámicos. En nuestro caso vamos a elegir un material cerámico para el uso de esta tecnología

La impresión 3D con materiales cerámicos mediante FDM requiere modificaciones especiales en la configuración de la impresora y la utilización de filamentos cerámicos en lugar de filamentos plásticos convencionales. Estos filamentos cerámicos están compuestos por una mezcla de polvo de cerámica y un polímero termoplástico que actúa como aglutinante.

El proceso de impresión es similar al de la impresión 3D convencional con FDM. La impresora 3D deposita el filamento cerámico capa por capa, utilizando un cabezal de extrusión que funde el polímero aglutinante y lo mezcla con el polvo de cerámica. A medida que se va depositando el material, se va solidificando y adhiriendo a la capa anterior.

Después de imprimir el objeto, es necesario realizar un proceso de postprocesamiento para eliminar el polímero aglutinante y consolidar la estructura cerámica. Esto generalmente implica la cocción del objeto en un horno a altas temperaturas para eliminar el polímero y sinterizar las partículas cerámicas, lo que resulta en una estructura cerámica sólida.

La impresión 3D FDM con materiales cerámicos ofrece varias ventajas, como la capacidad de fabricar objetos cerámicos complejos con geometrías intrincadas y la posibilidad de crear prototipos rápidos antes de la producción en masa. Sin embargo, también presenta algunos desafíos, como la necesidad de un postprocesamiento cuidadoso y la limitación en la resolución y precisión en comparación con otros métodos de impresión 3D cerámica más avanzados, como la estereolitografía (SLA) o la sinterización selectiva por láser (SLS). [1]
[2]

1.1 Ventajas de esta tecnología

La tecnología de impresión 3D conocida como FDM (Modelado por Deposición Fundida) se utiliza ampliamente para imprimir objetos con plásticos, pero también se ha adaptado para trabajar con materiales cerámicos. La impresión FDM con materiales cerámicos presenta varias ventajas significativas.

- Materiales:

La impresión FDM permite utilizar una amplia gama de materiales cerámicos, incluyendo alúmina, zirconia, carburo de silicio y otros. Esto proporciona flexibilidad en la elección de materiales para diferentes aplicaciones y propiedades deseadas.

- Precisión:

Los avances en la tecnología de FDM con materiales cerámicos han llevado a mejoras en la precisión, con una mayor resolución en la altura de las capas y la capacidad de imprimir detalles más finos, aunque la resolución sigue siendo una parte negativa de esta tecnología y hay que trabajar mas en ella.

La precisión en la impresión 3D FDM (Fused Deposition Modeling) depende de varios factores, como la resolución de la impresora, el tamaño de la boquilla, la calidad del filamento utilizado, la temperatura de extrusión, la velocidad de impresión y la geometría de la pieza impresa.

En general, la precisión de la impresión 3D FDM es menor que la de otros métodos de impresión 3D, como la estereolitografía (SLA) o la sinterización selectiva por láser (SLS), debido a la naturaleza del proceso de deposición de material capa por capa. Sin embargo, las impresoras 3D FDM modernas son capaces de producir piezas con una precisión de hasta 0,1 mm o incluso menos en algunas áreas.

Además, la precisión puede mejorarse mediante el uso de ajustes cuidadosos en la configuración de la impresora, la optimización de los parámetros de impresión y la elección de materiales de alta calidad. También se pueden utilizar técnicas de postprocesamiento, como el lijado y el recubrimiento, para mejorar aún más la precisión y la apariencia de la pieza impresa. [4]

- Velocidad:

La velocidad de impresión también ha mejorado en los últimos años. Las máquinas modernas pueden imprimir piezas más grandes y complejas en un tiempo mucho menor. Sin embargo, en términos generales, la velocidad de

impresión FDM se encuentra en el rango de 40-150 mm/s. Algunas impresoras 3D FDM pueden imprimir a velocidades aún más altas, pero esto puede afectar la calidad de impresión y aumentar la posibilidad de errores.

La tecnología FDM utiliza un proceso de deposición de material fundido, en el cual se alimenta un filamento de material termoplástico a través de una boquilla caliente que lo deposita en capas sucesivas para construir un objeto tridimensional. Este proceso es relativamente rápido, ya que cada capa se puede imprimir en cuestión de segundos. [5]

Además, la tecnología FDM permite imprimir múltiples objetos simultáneamente en la misma plataforma de impresión, lo que puede aumentar la eficiencia y la velocidad de producción.

Otra ventaja de la tecnología FDM en términos de velocidad es que los objetos impresos son relativamente ligeros en comparación con otros métodos de impresión 3D, lo que puede hacer que los tiempos de impresión sean más cortos y se requiera menos material para producir cada objeto.

- Facilidad de uso:

La impresión FDM es una tecnología relativamente fácil de usar y aprender. Los sistemas de impresión FDM son menos complejos en comparación con otros métodos de impresión 3D para cerámica, lo que facilita su operación y mantenimiento.

- Coste

En comparación con otras tecnologías de impresión 3D para cerámica, como la estereolitografía (SLA) o la sinterización selectiva por láser (SLS), la impresión FDM con materiales cerámicos puede ser más económica. Los materiales cerámicos utilizados en la impresión FDM suelen ser menos costosos que los materiales utilizados en otras tecnologías. [2]

- Personalización y prototipado rápido

La impresión FDM con materiales cerámicos permite la producción rápida de prototipos y piezas personalizadas. Esto es beneficioso en campos como la odontología, donde se pueden fabricar prótesis dentales a medida de forma más eficiente. [3]

1.2 Uso de materiales cerámicos en la impresión FDM

Sí, es factible emplear la tecnología de impresión 3D FDM (Modelado por Deposición Fundida) con materiales cerámicos, aunque se requieren configuraciones y ajustes especiales para llevar a cabo la impresión con éxito.

Los filamentos cerámicos poseen un punto de fusión elevado y son frágiles, por lo que se precisa una temperatura de extrusión alta y una velocidad de impresión lenta. Además, se recomienda el uso de una boquilla de impresión de mayor diámetro para prevenir obstrucciones y asegurar un flujo constante del material.

Algunos ejemplos de materiales cerámicos utilizados en la impresión 3D FDM incluyen arcilla, alúmina y zirconia. Estos materiales permiten la creación de piezas duraderas y resistentes a la corrosión, aunque su costo es mayor comparado con los filamentos plásticos convencionales.

En general, la impresión 3D con materiales cerámicos en FDM es más compleja y requiere un mayor nivel de habilidad y experiencia en comparación con la impresión 3D con plásticos. Sin embargo, esta tecnología ofrece numerosas oportunidades para fabricar piezas cerámicas personalizadas y de alta complejidad.

Al trabajar con este tipo de filamento, se han identificado algunos problemas recurrentes:

Problemas de adherencia: Los filamentos cerámicos tienden a no adherirse correctamente a la superficie de impresión. Para resolver esto, se puede aplicar una capa de adhesivo especial en la superficie de impresión antes de comenzar la impresión o aumentar la temperatura de la superficie para mejorar la adherencia. Personalmente, he encontrado que el uso de un producto común como la laca para el cabello de la marca Nelly resuelve eficazmente los problemas de adherencia.

Problemas de fragilidad: Los filamentos cerámicos son frágiles y pueden agrietarse durante la impresión. Una solución para esto es reducir la velocidad de impresión para disminuir la tensión ejercida sobre el material.

Problemas de limpieza: Los filamentos cerámicos pueden dejar residuos en la boquilla de impresión, lo cual puede obstruir el flujo del material. Es recomendable limpiar la boquilla de forma regular y utilizar un filamento de limpieza especial para evitar obstrucciones.

Problemas de calidad de impresión: La calidad de la impresión puede ser deficiente debido a la manera en que el material cerámico se deposita en la superficie de impresión. Para solucionar este problema, es posible ajustar la velocidad de impresión y la temperatura para mejorar la fusión del material.

1.3 Tipos de fabricación aditiva para materiales cerámicos.

Existen varios métodos de fabricación aditiva con materiales cerámicos. A continuación, se describen algunos de los más comunes:

- Sinterización por láser selectiva (SLS)

Es una técnica de fabricación aditiva que utiliza un láser para fusionar capas de material en polvo y construir objetos tridimensionales capa por capa. SLS se puede utilizar en una variedad de materiales, incluida la cerámica.

La sinterización por láser selectiva tiene ventajas sobre otros métodos, ya que permite una alta precisión de fabricación y la capacidad de producir productos con formas y características complejas. Además, SLS puede producir productos con alta resistencia y alta potencia, lo cual es muy importante para el uso de materiales de vidrio.

Pero la elección del material cerámico láser también es problemática. Por ejemplo, los materiales cerámicos son muy sensibles a los cambios de temperatura y el control del proceso de sinterización es muy difícil. Además, los materiales cerámicos son muy duros, difíciles e inestables. [7]

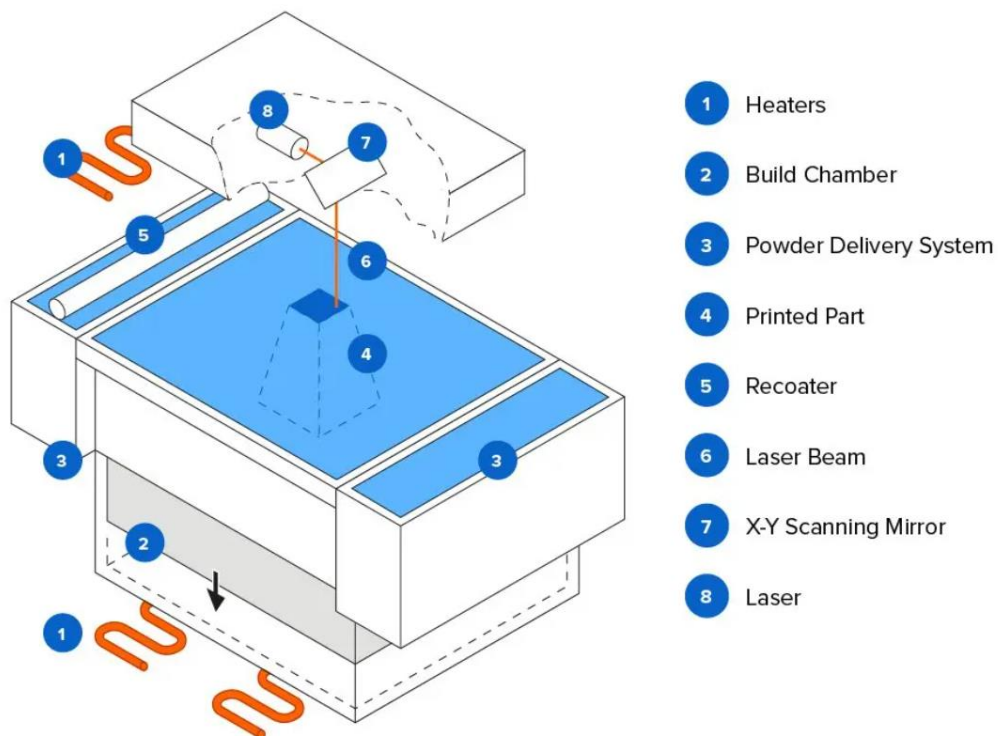


Ilustración 1. Técnica de sinterización por láser selectiva [7]

- Fusión por haz de electrones (EBM)

El proceso de fabricación aditiva utiliza un haz de electrones para fundir y fusionar material en capas sucesivas, lo que puede crear piezas y ensamblajes complejos con alta precisión y calidad.

La fusión por haz de electrones de materiales cerámicos consiste en depositar polvos cerámicos en capas finas y luego fundir y unir los polvos con un haz de alta energía. Repita este proceso capa por capa hasta obtener la forma deseada. Este método es muy preciso y puede producir piezas muy finas e intrincadamente marcadas.

Sin embargo, la fusión por haz de electrones de materiales cerámicos es un proceso difícil debido al alto calor, necesario para fundir el material cerámico, lo que puede provocar grietas y daños en las piezas. Además, la selección correcta del polvo cerámico, el tratamiento de la superficie y la eliminación del aire son muy importantes para la producción de materiales cerámicos con EBM. [8]

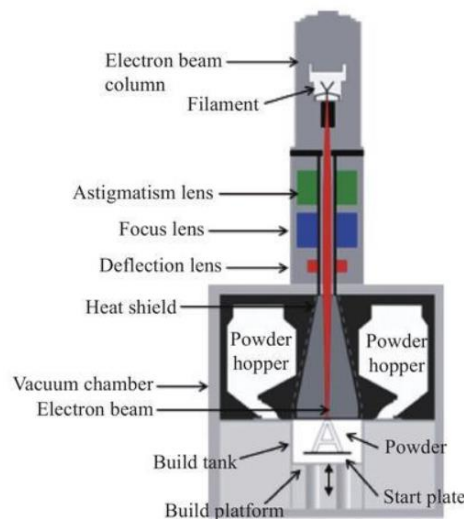


Ilustración 2. Técnica de fusión por haz de electrones [8]

- Fused Deposition Modeling (FDM)

La impresión cerámica por deposición fundida es un método de fabricación aditiva que emplea una impresora 3D especializada para crear objetos cerámicos. En este proceso, un material de cerámica fundido se deposita mediante una boquilla en movimiento tridimensional, capa tras capa, para obtener el objeto deseado.

Esta técnica posibilita la creación de objetos cerámicos complejos y detallados que serían difíciles o incluso imposibles de fabricar utilizando otros métodos. Además, el control preciso de la deposición de material en cada capa

permite la formación de estructuras internas sofisticadas, como canales y cavidades, lo cual resulta beneficioso en aplicaciones como la ingeniería biomédica y la manufactura de piezas de maquinaria.

No obstante, este proceso también conlleva desafíos particulares, como la necesidad de regular la temperatura y la viscosidad del material cerámico fundido para asegurar una deposición uniforme, así como la aplicación de tratamientos posteriores, como el sinterizado, para endurecer el objeto final.

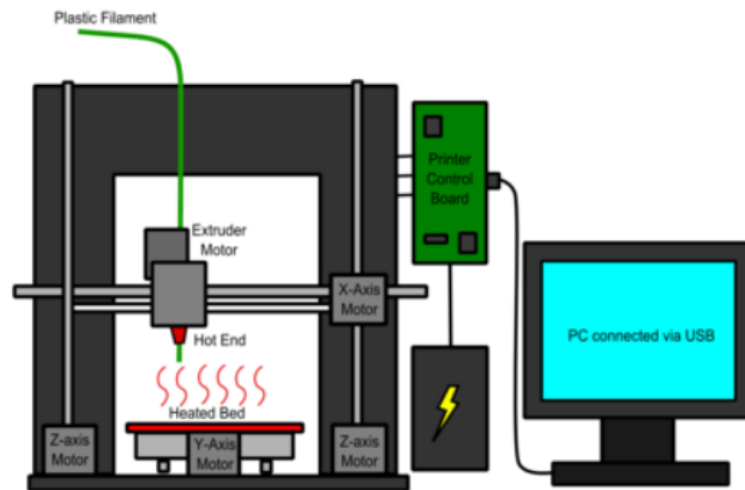


Ilustración 3. Partes de la impresora FDM

- Estereolitografía (SLA):

La impresión 3D mediante estereolitografía (SLA) es un método avanzado de fabricación que emplea la luz para solidificar capas de resina líquida de manera precisa y específica. En este proceso, se utiliza un láser o una fuente de luz ultravioleta (UV) para endurecer la resina líquida en un patrón definido. El procedimiento comienza vertiendo la resina líquida en una plataforma, donde el láser o la fuente de luz UV se mueven siguiendo un patrón específico para solidificar la resina y formar la primera capa del modelo. A continuación, la plataforma desciende permitiendo la impresión de la siguiente capa, y este ciclo se repite hasta completar todo el modelo deseado.

Una vez finalizada la impresión, la pieza impresa se retira del baño de resina y se somete a un proceso de limpieza utilizando un disolvente para eliminar cualquier exceso de resina. Seguidamente, se coloca la pieza en una cámara de curado UV, donde se expone a una fuente de luz ultravioleta para asegurar su completa solidificación.

La impresión 3D mediante estereolitografía (SLA) se emplea ampliamente en la fabricación de prototipos, modelos de alta precisión y componentes para las industrias médica y dental. Esta técnica ofrece un acabado de alta calidad y la capacidad de reproducir detalles muy finos, lo que

la convierte en una opción ideal para la creación de piezas con formas y detalles complejos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el costo de la impresora y los materiales utilizados es más elevado en comparación con otros métodos de impresión 3D. [9]

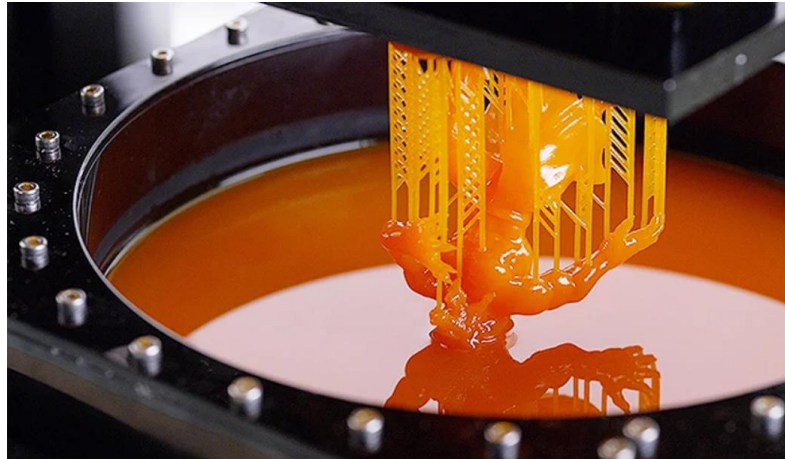


Ilustración 4. Pieza realizada por estereolitografía [9]

- Deposición líquida de material (LDM)

Es un proceso de fabricación aditiva que utiliza una boquilla para depositar material líquido capa por capa sobre un sustrato, con el fin de crear una pieza tridimensional. En el caso específico de la LDM con cerámica, se utiliza un material líquido que contiene partículas cerámicas suspendidas en él, en lugar de un polímero o metal, como en otros procesos de LDM.

La cerámica es un material duro y frágil que es conocido por sus propiedades aislantes y resistencia al calor. La LDM con cerámica tiene la ventaja de producir piezas con alta precisión dimensional y una excelente resistencia al desgaste, lo que la hace ideal para aplicaciones en la industria aeroespacial, médica y de ingeniería. [10]

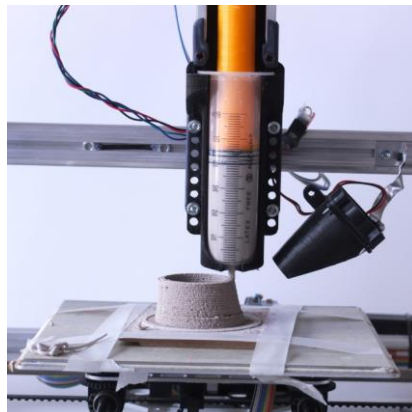


Ilustración 5. Pieza realizada por deposición líquida de material [10]

- Binder Jetting

Este revolucionario método de impresión 3D utiliza una técnica única que se destaca por su originalidad. En lugar de emplear métodos convencionales como la deposición de material fundido o la sinterización láser, esta técnica se basa en un enfoque innovador. La impresora 3D deposita cuidadosamente una fina capa de polvo y luego utiliza un agente aglutinante líquido para unir las partículas de manera cohesiva. Este proceso se repite capa tras capa con meticulosa atención hasta que el objeto deseado adquiere forma y estructura.

En el contexto de la impresión 3D con cerámica, el proceso sigue siendo sorprendente, aunque con algunas variaciones. Aquí, en lugar de utilizar plásticos o metales, se utiliza un polvo cerámico especializado. El agente aglutinante líquido, que puede ser agua, alcohol o diferentes solventes, se adapta al tipo específico de cerámica seleccionada. Una vez que la pieza se ha impreso con precisión y dedicación, se somete a un proceso de cocción en un horno. Es en esta etapa donde las partículas cerámicas se funden y solidifican, transformando el objeto en una obra sólida y duradera.

La impresión 3D con cerámica mediante la tecnología de Binder Jetting presenta numerosas ventajas que vale la pena destacar. Entre sus beneficios más notables se incluye la capacidad de fabricar piezas complejas con una precisión asombrosa. Además, ofrece la oportunidad de crear objetos personalizados, adaptados a las necesidades y preferencias individuales. No solo eso, sino que este enfoque innovador también permite reducir significativamente los costos de producción en comparación con los métodos tradicionales de fabricación de cerámica. Cabe mencionar también que la tecnología de Binder Jetting no se limita únicamente a la impresión con cerámica, sino que también se puede aplicar para imprimir piezas de metal y plástico, lo que la convierte en una opción extremadamente versátil en el ámbito de la fabricación aditiva. [10]

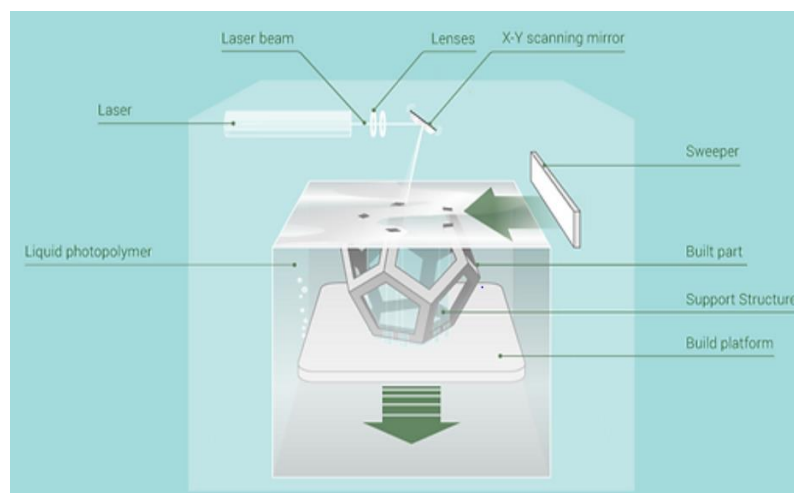


Ilustración 6. Técnica binder Jetting [10]

1.4 Diferentes componentes de las cerámicas técnicas

La producción de materiales cerámicos se logra a través de técnicas pulvimetalúrgicas, un proceso que abarca la obtención de polvos cerámicos, su compactación y sinterización, con el objetivo de obtener piezas cerámicas de alta densidad y resistencia mecánica.

Inicialmente, se lleva a cabo la generación del polvo cerámico mediante distintos métodos, como la molienda, atomización o precipitación química. Una vez obtenido el polvo, se realiza su mezcla con otros materiales como aglutinantes, lubricantes y aditivos.

Posteriormente, se procede a compactar el polvo mezclado aplicando una presión controlada utilizando diversas técnicas, como la compactación uniaxial, isostática o extrusión.

Por último, la pieza compactada se somete a un proceso de sinterización, en el cual se eleva la temperatura de manera significativa para que los polvos cerámicos se fusionen y adquieran mayor densidad. Durante este proceso, es posible regular la atmósfera y la velocidad de calentamiento con el fin de obtener las propiedades deseadas en el material cerámico final.

En el caso de la impresión 3D, se utilizan principalmente las cerámicas técnicas, las cuales han sido procesadas para obtener propiedades específicas que las hacen adecuadas para estas tecnologías. Estas cerámicas se dividen en dos categorías: óxidos y no óxidos.

1.4.1 Óxidos

Las cerámicas con partículas de óxidos son un tipo especial de material cerámico que presenta una composición en la cual se incluyen partículas de óxidos. Estas partículas pueden ser de diversos tipos, como aluminio, silicio, titanio, magnesio, zirconio, entre otros elementos.

La inclusión de estas partículas de óxidos tiene el potencial de potenciar las propiedades de las cerámicas de manera significativa. Por ejemplo, pueden mejorar su resistencia mecánica, haciéndolas más capaces de soportar cargas y fuerzas sin sufrir daños. Asimismo, la presencia de estas partículas puede aumentar la dureza de las cerámicas, lo que las hace más resistentes al desgaste causado por el roce o la abrasión.

Otra ventaja de incorporar partículas de óxidos en las cerámicas es su capacidad para aumentar la resistencia a la corrosión. Estas partículas actúan como barreras protectoras, impidiendo que agentes corrosivos dañen la estructura de la cerámica. Además, la presencia de óxidos puede conferir a las cerámicas una mayor conductividad eléctrica y térmica, lo que las hace útiles

en aplicaciones donde se requiere una transferencia eficiente de calor o electricidad.

Un aspecto adicional es que la adición de partículas de óxidos puede influir en la microestructura de la cerámica. Esto implica que se pueden modificar y mejorar las características internas de la cerámica, lo que tiene el potencial de potenciar aún más sus propiedades y rendimiento en diversas aplicaciones.

En resumen, las cerámicas con partículas de óxidos ofrecen una serie de beneficios, como la mejora de la resistencia mecánica, dureza, resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión y conductividad eléctrica y térmica. Además, la incorporación de estas partículas puede influir en la microestructura de la cerámica, brindando la oportunidad de optimizar aún más sus propiedades.

- Alúmina (Al_2O_3)

La alúmina, también conocida como trióxido de dialuminio (Al_2O_3), es un compuesto químico fascinante que se compone de dos átomos de aluminio y tres átomos de oxígeno. Este material cerámico excepcionalmente versátil ha ganado popularidad en una amplia gama de industrias, incluida la innovadora tecnología de impresión 3D. ¿Por qué? ¡Porque la alúmina es simplemente extraordinaria!

Sus propiedades deslumbrantes, como su increíble resistencia a la abrasión, su fuerza mecánica sobresaliente y su capacidad para resistir los embates químicos, la convierten en la opción preferida en muchas aplicaciones. Pero eso no es todo, la alúmina también muestra una notable capacidad para soportar altas temperaturas sin desmoronarse.

En nuestro emocionante proyecto, hemos empleado un filamento compuesto de alúmina, una elección que no nos ha defraudado en absoluto. Después de someter las probetas a un riguroso proceso de sinterización, nos hemos maravillado con las propiedades excepcionales de este material. Esas propiedades que ya conocíamos teóricamente se han hecho realidad ante nuestros ojos. ¡La alúmina es verdaderamente extraordinaria y estamos encantados de utilizarla en nuestro proyecto!

- Circona (ZrO_2):

El dióxido de circonio es el componente principal de la circona, un material cerámico altamente apreciado en el ámbito de la impresión 3D debido a sus notables características de resistencia y durabilidad. Existen diversas opciones de filamentos de circona disponibles en el mercado, siendo el Zetamix uno de los más destacados. Este material ofrece múltiples aplicaciones, especialmente en el campo de la odontología, donde se utiliza para la fabricación de piezas dentales de alta calidad.

Además de los filamentos comerciales, algunos fabricantes de impresoras 3D han incursionado en el desarrollo y venta de materiales de circona para la impresión 3D. Empresas como Lithoz, Admatec y 3D Ceram han apostado por la producción y comercialización de estos materiales especializados. De esta manera, los usuarios de impresoras 3D tienen acceso a una amplia gama de opciones para imprimir con circona, brindándoles mayor flexibilidad y adaptabilidad a sus proyectos.

Una de las ventajas notables de la circona es su compatibilidad con la mayoría de las impresoras 3D equipadas con extrusores directos. Esto facilita su utilización, ya que los usuarios no necesitan realizar modificaciones o adquirir equipos adicionales para imprimir con este material. La circona se ha convertido en una elección popular en el ámbito de la impresión 3D debido a su versatilidad y a las propiedades superiores que aporta a los objetos fabricados con ella.



Ilustración 7. Pieza realizada con circona

- Alúmina endurecida con circona.

La alúmina endurecida con zirconia, conocida como ZTA, se compone de alúmina y zirconia. Su principal ventaja radica en su mayor resistencia y su dureza más económica. Mediante la combinación de óxido de aluminio y óxido de circonio en proporciones de 10-20%, se logra obtener una mayor resistencia, tenacidad, dureza y resistencia al desgaste en comparación con la alúmina pura. El fenómeno responsable de este endurecimiento se conoce como endurecimiento por transformación. Bajo tensiones, las partículas de zirconia experimentan un cambio en su estructura cristalina, pasando de una estructura tetragonal a una monoclínica. Esto resulta en una expansión de volumen que comprime la grieta circundante en la matriz de alúmina, incrementando así la tenacidad a la fractura de la ZTA.

1.4.2 No óxidos

En la impresión 3D, hay tecnologías y materiales específicos diseñados para imprimir cerámica sin oxidación. Estos materiales cerámicos están formulados para resistir la oxidación durante el proceso de impresión y durante su posterior cocción.

- Carburo de silicio

El carburo de silicio sobresale por su asombrosa dureza, superando en cuatro veces la resistencia del acero inoxidable. Cuando se infiltra silicio en su estructura, este material se convierte en uno de los metales más resistentes del mundo. Además de su solidez excepcional, esta cerámica destaca por su notable ligereza y resistencia, superando a otras cerámicas en estas cualidades. Su alta resistencia a los ácidos la convierte en la cerámica más resistente a la corrosión. Este compuesto versátil se utiliza ampliamente en diversos componentes, como sellos mecánicos, piezas de bombas, frenos y embragues de automóviles. Incluso se emplea en placas cerámicas que forman parte de chalecos antibalas debido a sus propiedades sobresalientes.

- Carburo de Boro

El carburo de boro exhibe cualidades particularmente atractivas bajo condiciones de alta temperatura, ya que su punto de fusión sobrepasa los 3000 °C. Además de su resistencia a la oxidación, destaca por su notable capacidad para conducir tanto el calor como la electricidad. Estas características hacen que este material sea altamente versátil en diferentes campos de aplicación, como recubrimientos refractarios, electrodos, dispositivos microelectrónicos y herramientas de corte. Además, el carburo de boro juega un papel crucial en el ámbito militar y de defensa, siendo fundamental en la fabricación de blindajes para tanques, chalecos antibalas y otras aplicaciones similares.

- Nitruro de silicio

El nitruro de silicio se destaca como una de las cerámicas técnicas más duras y resistentes que se pueden encontrar. A pesar de tener una baja densidad, muestra una alta tenacidad y una increíble resistencia a la flexión. Además, tiene una capacidad sobresaliente para soportar cambios bruscos de temperatura sin sufrir ningún tipo de daño. Sus aplicaciones son diversas y abarcan una amplia gama de sectores. Se utiliza en la fabricación de componentes para bombas, válvulas y semiconductores, entre otro. [11] [12]

2. Objetivos.

El sinterizado es un proceso utilizado en la fabricación de probetas de alúmina con el fin de lograr la densificación y consolidación del material cerámico. Los objetivos del sinterizado pueden variar según la aplicación específica y las propiedades deseadas del producto final. A continuación, se mencionan algunos de los objetivos comunes del sinterizado de probetas de alúmina:

Alcanzar una alta densidad: El objetivo principal del sinterizado es lograr una densidad óptima en las probetas de alúmina. Durante el proceso de sinterización, se calientan las partículas de alúmina a altas temperaturas, lo que permite su fusión y una reducción del espacio poroso, aumentando así la densidad del material.

Lograr una consolidación estructural: Otro objetivo del sinterizado es obtener una consolidación estructural en las probetas de alúmina. Mediante la aplicación de calor y compresión a las partículas de alúmina, se favorece la formación de enlaces entre ellas, generando una estructura sólida y resistente.

Mejorar las propiedades mecánicas: El sinterizado tiene la capacidad de mejorar las propiedades mecánicas de las probetas de alúmina, como la resistencia a la compresión, la dureza y la tenacidad. Durante el proceso, se eliminan porosidades y defectos, lo que conduce a una mayor resistencia y a una mejor capacidad de respuesta ante cargas mecánicas.

Controlar la porosidad: Dependiendo de la aplicación específica, puede ser deseable contar con cierto grado de porosidad en las probetas de alúmina. En este caso, el objetivo es lograr una porosidad controlada y uniforme que proporcione propiedades específicas, como una alta resistencia a la corrosión o una mejor capacidad de intercambio de gases.

Garantizar la estabilidad dimensional: Durante el sinterizado, las probetas de alúmina experimentan cambios dimensionales debido a la contracción térmica. Un objetivo importante es controlar y minimizar estos cambios para asegurar la estabilidad dimensional del producto final.

Optimizar el tiempo y la temperatura de sinterización: Se busca encontrar la combinación óptima de tiempo y temperatura de sinterización que permita obtener los mejores resultados en términos de densidad, propiedades mecánicas y estabilidad dimensional, al mismo tiempo que se minimiza el consumo de energía y se asegura la viabilidad económica del proceso.

3. Maquinaria, utensilios y modo de empleo

3.1. Equipamiento

3.1.1. Impresora FDM

Esto es a lo que primero que nos enfrentamos en esta investigación, la impresora FDM. El uso de la impresora forma uno de los pilares de este TFG ya que con esta fabricamos nuestras probetas de alúmina para posteriormente realizar todos los ensayos y caracterización. En mi caso he utilizado una impresora de la marca “Ultimaker” y modelo “S5”.

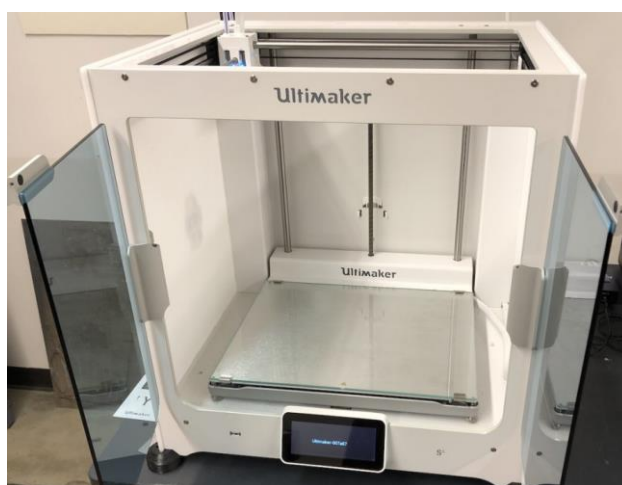


Ilustración 8. Impresora FDM utilizada

La impresora Ultimaker S5 es un modelo de impresora 3D de alto rendimiento desarrollado. Aquí tienes algunas de las propiedades destacadas de la Ultimaker S5:

Volumen de impresión: La Ultimaker S5 tiene un amplio volumen de impresión de 330 mm x 240 mm x 300 mm (13 pulgadas x 9.4 pulgadas x 11.8 pulgadas). Esto significa que puedes imprimir objetos relativamente grandes en comparación con otras impresoras 3D de escritorio.

Calidad de impresión: La Ultimaker S5 ofrece una alta calidad de impresión con una resolución de capa de hasta 20 micrones (0.02 mm). Esto permite obtener detalles finos y superficies suaves en tus impresiones. Aunque si necesitamos más detalle podemos recurrir a boquillas de 0.1 mm, nosotros hemos usado la boquilla que nos proporciona el fabricante.

Conectividad y control: La impresora se puede controlar de manera inalámbrica a través de la red local o mediante conexión USB. Además, cuenta con una pantalla táctil a color integrada que facilita la navegación y el control de las funciones de la impresora.

Materiales compatibles: La Ultimaker S5 es compatible con una amplia gama de materiales de impresión, incluyendo PLA, ABS, CPE, Nylon, TPU y muchos otros filamentos estándar. También admite materiales compuestos y reforzados con fibra de vidrio o carbono para aplicaciones más exigentes. Esto nos resulta muy útil ya que podemos usar nuestro filamento cerámico sin ningún problema

Software y compatibilidad: La Ultimaker S5 es compatible con el software de impresión Ultimaker Cura, que proporciona una interfaz intuitiva para preparar tus modelos 3D para la impresión. También es compatible con otros programas de diseño y preparación de impresión 3D estándar de la industria.[14]

3.1.2 Máquina baño maría



Ilustración 9. Máquina usada para el baño de acetona

Este es el siguiente paso después de imprimir las probetas, sumergimos nuestras probetas en un baño de acetona durante 2 horas.

El baño maría con acetona es una técnica comúnmente utilizada para realizar tratamientos térmicos en muestras o probetas que contienen alúmina. La acetona se utiliza como medio de transferencia de calor debido a su alta capacidad de evaporación y su capacidad para proporcionar una temperatura constante durante el proceso.

Hay que tener en cuenta que el punto de ebullición de la acetona es de aproximadamente 56 °C. Esto significa que el baño maría con acetona puede alcanzar temperaturas cercanas a ese valor. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la temperatura del baño maría no debe superar la temperatura máxima recomendada para las probetas de alúmina, ya que podrían producirse daños o alteraciones en las propiedades del material. Nosotros hemos utilizado

una temperatura de 40 °C para nuestro experimento tal como nos recomienda el fabricante.

Gracias a este baño podemos retirar parte de la matriz termoplástica que tienen nuestras probetas consiguiendo que nuestras probetas tengan menos porosidad y mayor densidad una vez sinterizadas.

3.1.3 Horno



Ilustración 10. Horno de altas temperaturas utilizado

Tras el proceso anterior y posterior secado seguimos teniendo unas probetas con gran cantidad de PLA, por ello estas probetas son relativamente frágiles y maleables.

Para eliminar ese PLA y obtener probetas cerámicas con mejores propiedades metemos estas probetas a un horno de altas temperaturas donde primero hacemos un “debinding” con los siguientes parámetros de temperatura:

segment	From (°C)	To (°C)	Heating rate (°C/h)	Dwell time (h)	Segment duration (min)	Duration in total (h)
0		20			0	0
1	20	125	35		180	3h
2	125	200	50		90	4h30
3	200	215	22		40	5h10
4	215	250	11		180	8h10
5	250	280	20		90	9h40
6	280	320	8		300	14h40
7	320	510	24		480	22h40

Tabla 1. Quemado

Gracias a este proceso conseguimos eliminar todo el PLA que tenían nuestras probetas.

Posteriormente hacemos un sinterizado a estas probetas, iremos cambiando la temperatura haciendo diferentes sinterizados hasta obtener el mas óptimo para este material siempre teniendo como una temperatura máxima de 1550 °C.

Mediante estos procesos obtenemos en nuestras probetas las características típicas de los materiales cerámicos como alta dureza y resistencia al desgaste entre otros.

Este es proceso es muy importante ya que según los parámetros que se utilicen ya que podremos aumentar su resistencia lo que la convierte en un material ideal para aplicaciones que requieren componentes resistentes al desgaste, la abrasión y la corrosión. La sinterización mejora aún más estas propiedades, lo que resulta en probetas de alúmina extremadamente duraderas y resistentes. También obtendremos mejor pureza ya que la sinterización de probetas de alúmina se lleva a cabo a altas temperaturas, lo que permite eliminar las impurezas presentes en el material. Esto resulta en probetas de alúmina de alta pureza con propiedades consistentes y predecibles.

En resumen, la sinterización de probetas de alúmina ofrece ventajas como alta resistencia, estabilidad térmica, alta pureza, dimensiones precisas, versatilidad, aislamiento eléctrico y biocompatibilidad, lo que la convierte en un material ampliamente utilizado en diversas industrias.

3.1.4. Máquina de ensayos



Ilustración 11. Maquinaria de ensayos de resistencia a flexión

Esta es la parte donde ponemos a prueba nuestras probetas después del sinterizado.

Esta máquina utiliza el principio de la flexión en tres puntos, que es una técnica común para evaluar la resistencia y flexibilidad de los materiales. Consiste en aplicar una carga en el centro de una muestra colocada en soportes y medir la deflexión o deformación resultante.

Nosotros hemos utilizado la MTS Insight 5, esta es un sistema de prueba de materiales que incluye una serie de componentes y características para llevar a cabo las pruebas de flexión en tres puntos de manera precisa y confiable.

Podemos destacar su celda de carga de alta precisión que mide la fuerza aplicada a la muestra durante la prueba hasta 5 kN, su software dedicado que permite controlar y monitorear la máquina de manera eficiente o sus soportes ajustables que nos permiten ver con exactitud la curva de resiliencia. [15]

3.1.4. Balanza

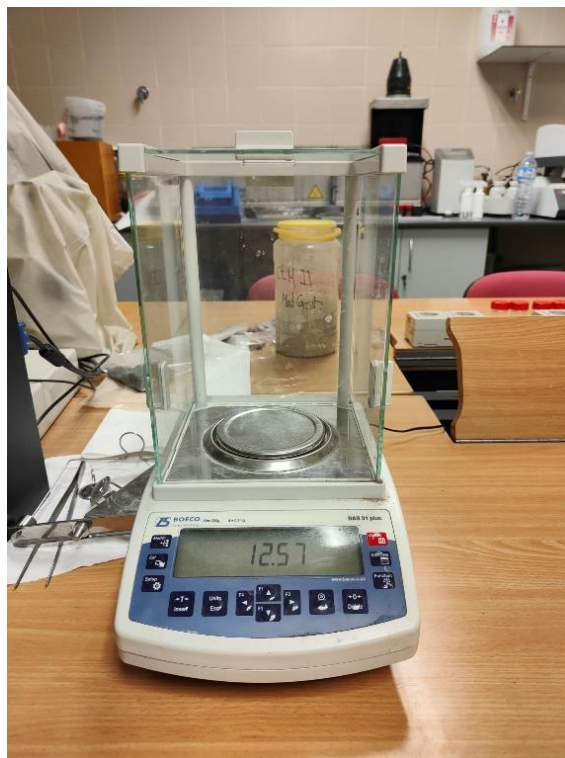


Ilustración 12. Balanza utilizada

Gracias a la balanza podemos determinar la densidad y porosidad de nuestras probetas, algo muy importante ya que al trabajar con un material cerámico impreso en 3D ya que se crean microporos que pueden hacer que nuestros resultados varíen en el ensayo de flexión. En esta balanza hemos realizado pesados en seco e hidrostáticos.

Nuestra bascula esta fabricada por Boeco, concretamente el modelo “Bas 31 plus”, es una bascula analítica que cuenta con una precisión de 0.0001 gr con una desviación de $\pm 0,0002$ gr, calibración interna y tara de 220 gr. [16]

Para el uso de esta balanza he tenido varios problemas, debido a que, al trabajar con tolerancias tan pequeñas, necesitaba calibrar esta máquina para cada pesada y limpiar la superficie del plato cada poco tiempo.

Gracias a esto he podido obtener unos resultados con muy bajo error y mucha exactitud.

3.1.5. Bomba de vacío y desecador



Ilustración 13. Bomba de vacío y desecador utilizados

Un desecador es un dispositivo utilizado en laboratorios y entornos científicos para crear un ambiente seco. Su función principal es mantener el contenido dentro del desecador libre de humedad o protegerlo de la humedad ambiental.

El desecador consta de una caja hermética con una tapa que se sella de manera efectiva para evitar que la humedad ingrese al interior. La tapa del desecador generalmente tiene un sello de goma o silicona para lograr un cierre hermético.

Conectamos este desecador a una bomba de vacío y conseguimos una depresión dentro del recipiente, gracias a esto conseguimos eliminar el aire dentro de los poros de la probeta y hacer la pesada hidrostática. Normalmente mantenemos las probetas en este proceso unos 10 minutos para asegurarnos que el proceso se ha realizado correctamente.

3.2. Material

Este es el material elegido para nuestro proyecto. El Zetamix Alúmina es un tipo de filamento que combina una mezcla de polvo de alúmina y aglutinante. Este filamento está compuesto por un 83% en peso de polvo de alúmina y un 17% en peso de aglutinante. La alúmina, que es el óxido de aluminio más común, se utiliza ampliamente en la industria y en diversas aplicaciones de ingeniería.

Lo que hace destacar a la alúmina es su notable resistencia térmica y su alto punto de fusión. Estas características la convierten en un material refractario muy adecuado para su uso en aplicaciones de alta temperatura. Es especialmente útil en situaciones donde se requiere un material que pueda soportar condiciones extremas y mantener su integridad estructural incluso a temperaturas elevadas.

Gracias a su excepcional dureza de 9 en la escala de Mohs y su notable resistencia a la abrasión, la alúmina se emplea frecuentemente en aplicaciones que requieren elementos abrasivos. Esta característica la convierte en una alternativa económica al diamante sintético.

Sin embargo, una de las aplicaciones más fascinantes en el ámbito de la impresión 3D es su utilización en la fabricación de filtros catalizadores o purificadores de aire. La alúmina posee una capacidad sobresaliente para absorber agua y actuar como catalizador en reacciones químicas específicas, como el proceso de Claus. Cuando se combina esta propiedad con la capacidad de la impresión 3D para crear piezas con una relación superficie-volumen elevada, se logra una tecnología económica y eficiente para la producción de filtros catalizadores. [13]

Estas serian algunas de sus características.

Información general	
Fabricante	Nanoe (Zetamix)
Material	Polvo de alúmina y aglutinante termoplástico
Formato	Bobina de 500 g
Densidad	2.5 g/cm ³
Cantidad de metal (volumen)	52 %
Cantidad de metal (masa)	83 %
Diámetro de filamento	1.75 ó 2.85 mm
Tolerancia de diámetro	-
Longitud filamento	±83 m (Ø 1.75 mm-0.5Kg) ±31 m (Ø 2.85 mm-0.5Kg)
Color	Blanco

Ilustración 14. Propiedades de la Alúmina

3.3. Software

3.3.1. Diseño de probeta

Para el diseño de la probeta hemos utilizado Catia, ofrece una amplia gama de herramientas y funcionalidades para ayudar en el proceso de diseño y desarrollo de productos. Se ha considerado la normativa EN 843-1:2006 como base para la creación de las probetas y después se ha escalado un 120% en cura para que después del sinterizado obtener las dimensiones con las que se han diseñado. Las probetas se han diseñado con una longitud de 50mm, un ancho de 4.5mm y un espesor de 3mm. Tras el sinterizado hemos obtenido unas dimensiones similares tal y como podemos ver en las tablas de resultados.

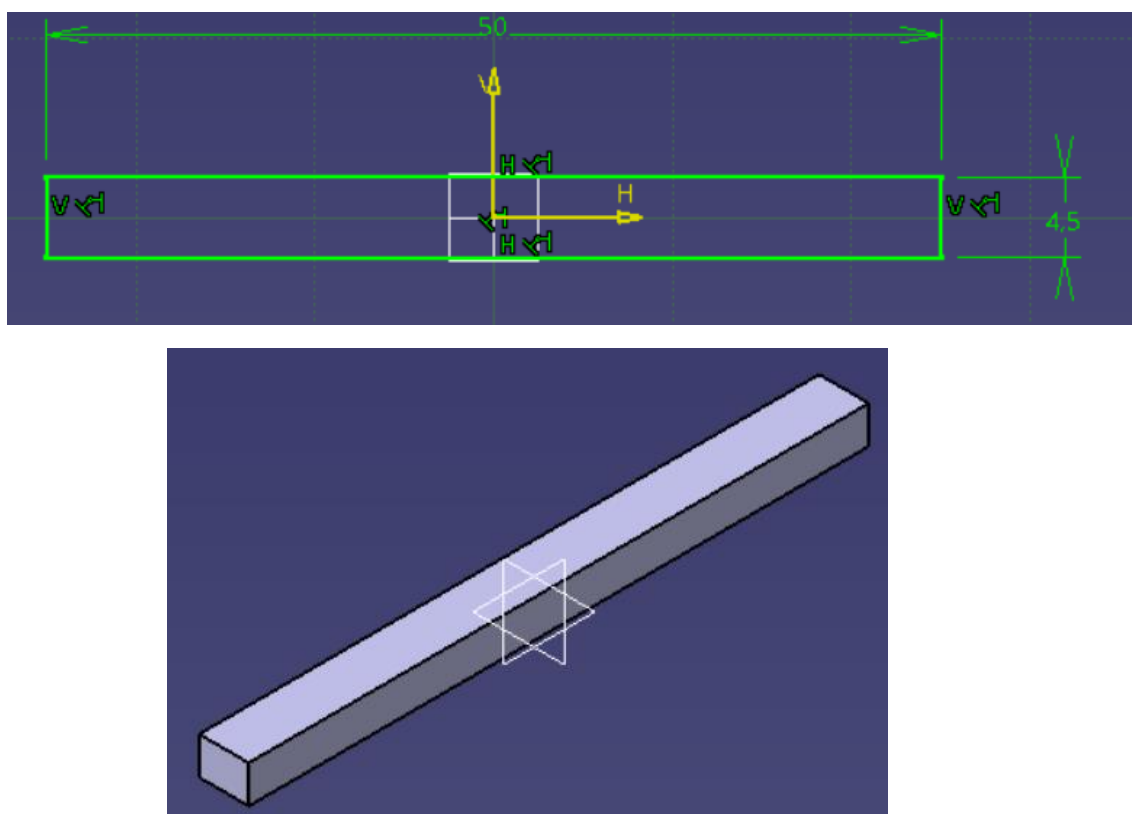


Ilustración 15. Diseño de probetas

3.3.2. Laminador

Después de completar el diseño en CAD, requerimos un laminador debido a que la impresora solo puede interpretar G-code. He optado por utilizar el laminador Ultimaker Cura, ya que es el que suelo utilizar con mayor frecuencia y ofrece resultados superiores.

Ultimaker Cura cuenta con una interfaz intuitiva que facilita la carga de archivos de modelos 3D, su correcta ubicación y orientación en la plataforma de impresión, así como la personalización de los parámetros de impresión según los requisitos específicos del proyecto. Este software también proporciona herramientas para agregar o eliminar soportes, ajustar la densidad de relleno y establecer la calidad de impresión deseada.

Una vez que el modelo ha sido configurado, Ultimaker Cura genera un archivo G-code. Este archivo consiste en un lenguaje de programación que la impresora 3D utiliza para imprimir el objeto de forma gradual, capa por capa. El archivo G-code puede ser guardado en una tarjeta SD o enviado directamente a la impresora mediante una conexión USB.

3.3.3. Estudio estadístico

Para obtener resultados coherentes y confiables, es necesario utilizar un software que nos permita procesar los datos recopilados en las pruebas de densidad y flexión. En nuestro caso, utilizaremos el programa Anova (Análisis de Varianza), que es una técnica estadística utilizada para analizar la variabilidad en los datos y determinar si existen diferencias significativas entre las medias de dos o más grupos. Esta técnica es comúnmente empleada en investigaciones científicas y sociales para comparar los efectos de diferentes tratamientos o condiciones.

El análisis de varianza se basa en la descomposición de la variabilidad total de los datos en diferentes componentes: la variabilidad entre los grupos y la variabilidad dentro de los grupos. El objetivo principal es comparar la variación entre los grupos con la variación dentro de los grupos, a fin de determinar si las diferencias observadas entre las medias de los grupos son estadísticamente significativas. [17]

4. Probetas

Para estudiar las características de la alúmina hemos fabricado unas probetas de este material gracias a todos los procedimientos que hemos expuesto anteriormente. Los parámetros en los que hemos fabricado estas probetas en la impresora FDM son:

Boquilla	0.4 mm
Velocidad de impresión	30 mm/s
Recuento de líneas de pared	3
Densidad de relleno	100%
Patrón de relleno	Zig-Zag
Dirección de extrusión	45/-45°
Altura de capa	0.1 mm
Temperatura de la cama	60 °C
Temperatura de extrusión	215 °C
Retracción de material	4 mm
Tamaño largo de probeta	50 mm
Tamaño ancho de probeta	5 mm
Tamaño alto de probeta	3 mm

Tabla 2. Parámetros de impresión

Hemos realizado con estos parámetros 30 probetas, estas probetas las hemos dividido en grupos de 5 para realizar un sinterizado diferente para cada grupo de probetas.

De estos grupos de probetas estudiaremos tanto densidad como flexión y obtendremos que grupo de probetas obtiene mejores características para este material. Esto nos dará referencia sobre el procedimiento que debemos usar para realizar cualquier tipo de proyecto y obtener los mejores resultados.

4.1. Tipos de Probetas

4.1.1. Probetas para flexión

Las 30 probetas realizadas por impresión 3D se van a dividir en 6 grupos según el sinterizado realizado.

Se ha considerado la normativa EN 843-1:2006 como base para la creación de las probetas utilizadas en el ensayo de flexión. Esta normativa se enfoca en las cerámicas técnicas avanzadas y establece las propiedades mecánicas a temperatura ambiente, específicamente la determinación de la resistencia a la flexión.

De acuerdo con dicha norma, se contemplan dos opciones de tamaño para llevar a cabo este ensayo, denominadas A y B. Estos tamaños no solo varían en las dimensiones de la probeta en sí, sino también en la distancia entre los puntos de apoyo (span). En el presente caso, se ha optado por utilizar el ensayo de tipo B. [18]

Pieza de prueba tipo:	Condición de la superficie	Parámetro	Dimensiones		
			Longitud	Ancho	Espesor
Tipo A	Todo	Rango dimensional	≥ 25	$2,5 \pm 0,2$	$2,0 \pm 0,2$
	Maquinado	Tolerancia de paralelismo	-	$\pm 0,02$	$\pm 0,02$
	Sinterizado	Tolerancia de paralelismo	-	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$
Tipo B	Todo	Rango dimensional	≥ 45	$4,0 \pm 0,2$	$3,0 \pm 0,2$
	Maquinado	Tolerancia de paralelismo	-	$\pm 0,02$	$\pm 0,02$
	Sinterizado	Tolerancia de paralelismo	-	$\pm 0,10$	$\pm 0,10$

Tabla 3. Creación probetas según la normativa EN 843-1:2006[18]

Los diferentes grupos se diferencian por estos sinterizados, tanto el sinterizado que nos recomienda el material como los propuestos por nosotros.

El primer paso de este procedimiento es el quemado, en el cual eliminamos la mayor parte del PLA que contiene nuestras probetas de alúmina. Para este proceso vamos a usar el quemado que nos recomienda el fabricante y otra variante propuesta por nosotros.

En el caso de nuestra variante, lo que buscamos es no dejar enfriar nuestro material después del quemado, por lo que nuestro sinterizado comenzara a partir de 510 °C, nuestra idea principal es ahorrar tiempo y dinero en este tipo de sinterizados ya que si utilizamos en fin del quemado como punto de partida de nuestro sinterizado y obtenemos las mismas características o mejores, nos estaríamos ahorrando el tiempo de enfriado de las probetas de 510°C a temperatura ambiente y volver a calentarlas a esa temperatura y el coste eléctrico de este proceso.

- Quemado recomendado por el fabricante

segment	From (°C)	To (°C)	Heating rate (°C/h)	Dwell time (h)	Segment duration (min)	Duration in total (h)
0		20			0	0
1	20	125	35		180	3h
2	125	200	50		90	4h30
3	200	215	22		40	5h10
4	215	250	11		180	8h10
5	250	280	20		90	9h40
6	280	320	8		300	14h40
7	320	510	24		480	22h40
8	510	20	50		588	32h28

Tabla 4. Quemado recomendado por el fabricante

- Nuestra alternativa

segment	From (°C)	To (°C)	Heating rate (°C/h)	Dwell time (h)	Segment duration (min)	Duration in total (h)
0		20			0	0
1	20	125	35		180	3h
2	125	200	50		90	4h30
3	200	215	22		40	5h10
4	215	250	11		180	8h10
5	250	280	20		90	9h40
6	280	320	8		300	14h40
7	320	510	24		480	22h40

Tabla 5. Nuestra alternativa de quemado

- Sinterizado

El sinterizado de probetas de alúmina impresas en 3D es un proceso utilizado para consolidar y fortalecer las piezas impresas en 3D hechas de alúmina, que es un material cerámico resistente y de alta temperatura.

El proceso de sinterización implica calentar las probetas de alúmina impresas en 3D a una temperatura alta, pero por debajo de su punto de fusión. A medida que se calienta, las partículas de alúmina comienzan a fundirse parcialmente y luego se solidifican nuevamente, lo que permite que las partículas se fusionen entre sí y formen una estructura sólida. Esto resulta en una pieza de alúmina densa y resistente. La sinterización se realiza típicamente en un horno especializado que puede alcanzar temperaturas muy altas y

mantener una atmósfera controlada. La temperatura y el tiempo de sinterización dependen de varios factores, como el tamaño y la geometría de las probetas, así como de las propiedades específicas del material de alúmina utilizado.

Es importante tener en cuenta que el proceso de sinterización puede provocar cierto grado de contracción en las piezas impresas en 3D. Por lo tanto, es posible que sea necesario tener en cuenta esta contracción al diseñar las probetas para lograr las dimensiones finales deseadas.

Tras comentar anteriormente los diferentes quemados que vamos a realizar este es el momento de mostrar el tipo de sinterizados que vamos a hacer:

Tipo de sinterizado	Quemado	Temperatura de tramo inicial (°C)	Temperatura de tramo final (°C)	Rampa de temperatura (°C/h)	Tiempo mantenido en el tramo (h)
A	Fabricante	20	1550	50	-
		1550	1550	-	2
		1550	20	100	-
B	Nuestra alternativa	510	1550	50	-
		1550	1550	-	2
		1550	20	100	-
C	Fabricante	20	1000	50	-
		1000	1000	-	2
		1000	1500	50	-
		1500	1500	-	2,5
		1500	20	100	-
D	Nuestra alternativa	510	1000	50	-
		1000	1000	-	2
		1000	1500	50	-
		1500	1500	-	2,5
		1500	20	100	-
E	Fabricante	20	1300	50	-
		1300	1300	-	2
		1300	1500	50	-
		1500	1500	-	2,5
		1500	20	100	-
F	Nuestra alternativa	510	1300	50	-
		1300	1300	-	2
		1300	1500	50	-
		1500	1500	-	2,5
		1500	20	100	-

Tabla 6. Tipos de sinterizado

Tipo de sinterizado	temperatura (°C)	Tiempo total (h)
A	20	0
	1550	30,6
	1550	32,6
	20	47,9
B	510	0
	1550	20,8
	1550	22,8
	20	38,1
C	20	0
	1000	19,6
	1000	21,6
	1500	31,6
	1500	34,1
	20	48,9
D	510	0
	1000	9,8
	1000	11,8
	1500	21,8
	1500	24,3
	20	39,1
E	20	0
	1300	25,6
	1300	27,6
	1500	31,6
	1500	34,1
	20	48,9
F	510	0
	1300	15,8
	1300	17,8
	1500	21,8
	1500	24,3
	20	39,1

Tabla 7. Tiempo total de cada sinterizado

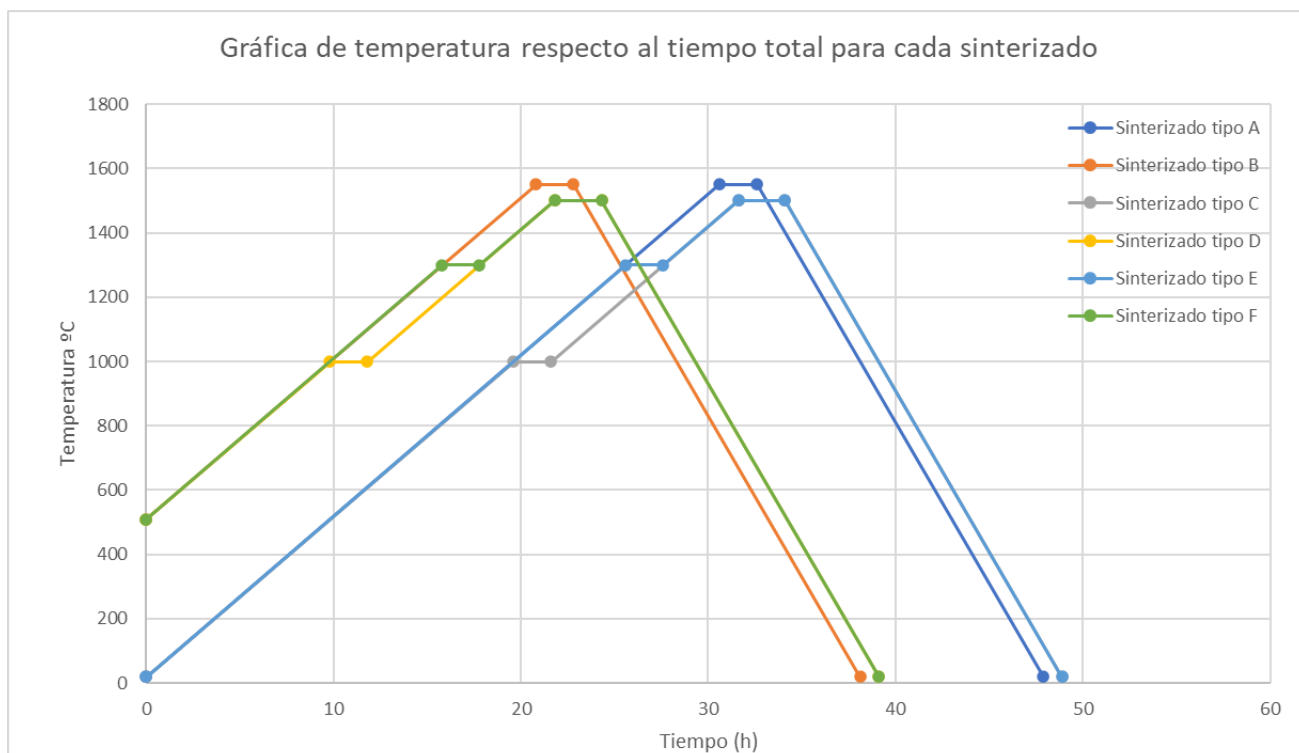


Ilustración 16. Gráfico de temperatura respecto a tiempo total

Como se puede observar, el sinterizado tipo B es el mas corto de todos, mientras los sinterizados C y E son los más largos, esto producirá un mayor gasto de energía al realizar nuestro proyecto.

Si queremos trasladar estos sinterizados a una producción de gran volumen tenemos que tener muy en cuenta estos tiempos a la hora de elegir nuestro sinterizado ya que puede ser un gran ahorro para la empresa y diferenciarla de otras en el mercado por sus mejores precios.

5. ENSAYOS Y TRATAMIENTO DE RESULTADOS

5.1. Flexión

5.1.1 Descripción de ensayo

El ensayo de flexión en 3 puntos es una prueba mecánica utilizada para evaluar la resistencia y la rigidez de un material o una estructura ante fuerzas aplicadas en su superficie. Este ensayo se realiza aplicando una carga en forma de fuerza perpendicular en dos puntos de apoyo y una carga en el centro del material, generando un momento de flexión.

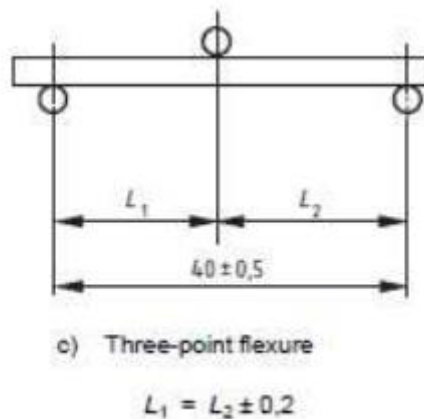


Ilustración 17. Colocación de probeta en f3p

Los ensayos se realizaron siguiendo la normativa EN 843-1:2006 como referencia. Se requiere ajustar la velocidad del ensayo para lograr la rotura en un tiempo comprendido entre 5 y 15 segundos. Para un material con una resistencia esperada entre 200 y 400 MPa, se recomienda una velocidad de 0,5 mm/min [21]. Sin embargo, se observó que a esta velocidad las probetas tardaban demasiado en romperse, por lo que se decidió ajustarla a 1,2 mm/min. [18]

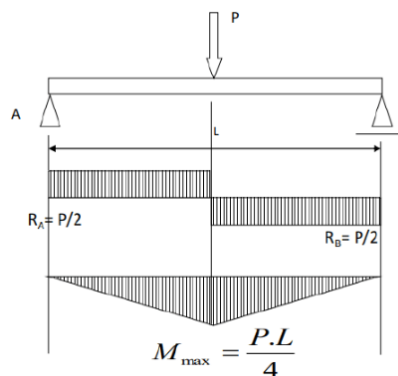


Ilustración 18. Reacciones producidas en ensayo f3p

El objetivo de este ensayo es obtener la fuerza necesaria para flectar nuestra probeta hasta su fallo. Para ello colocamos la probeta entre los dos apoyos distanciados entre sí 40 mm y aplicamos una fuerza constante en el centro con una velocidad de desplazamiento anteriormente establecida. Una vez que la probeta haya flectado hasta su rotura, la máquina lo detectará y cesará su avance dando por concluido el avance y proporcionándonos los resultados obtenidos.

La tensión de fractura se determinará con la siguiente fórmula:

$$\sigma_f = \frac{3Fl}{2bh^2}$$

- σ_f es la resistencia a la fractura expresada en newton por milímetro² (MPa);
- F es la fuerza pico a la fractura, expresada en newtons (N);
- b es el ancho de la pieza, expresado en milímetros (mm), la media de tres medidas;
- h es el espesor de la pieza, expresado en milímetros (mm), la media de tres medidas;
- l es la distancia entre centros de los rodillos de soporte exteriores (flexión en tres puntos), expresada en milímetros (mm).

5.1.2 Resultados de los ensayos y tratamiento estadístico.

Después de haber realizado el ensayo de resistencia a flexión hemos obtenido los datos reflejados en el Anexo I. Para poder ver los efectos de las distintas sinterizaciones en nuestras probetas, se le ha realizado un estudio estadístico.

Los datos han sido tratados por la aplicación minitab, donde comparamos las medias de cada uno de los grupos como obtenemos la varianza y el error de estos.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	5	10581	44,18%	10581	2116,2	3,48	0,018
Error	22	13371	55,82%	13371	607,8		
Total	27	23952	100,00%				

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	PRESS	R-cuadrado (pred)
24,6529	44,18%	31,49%	20896	12,76%

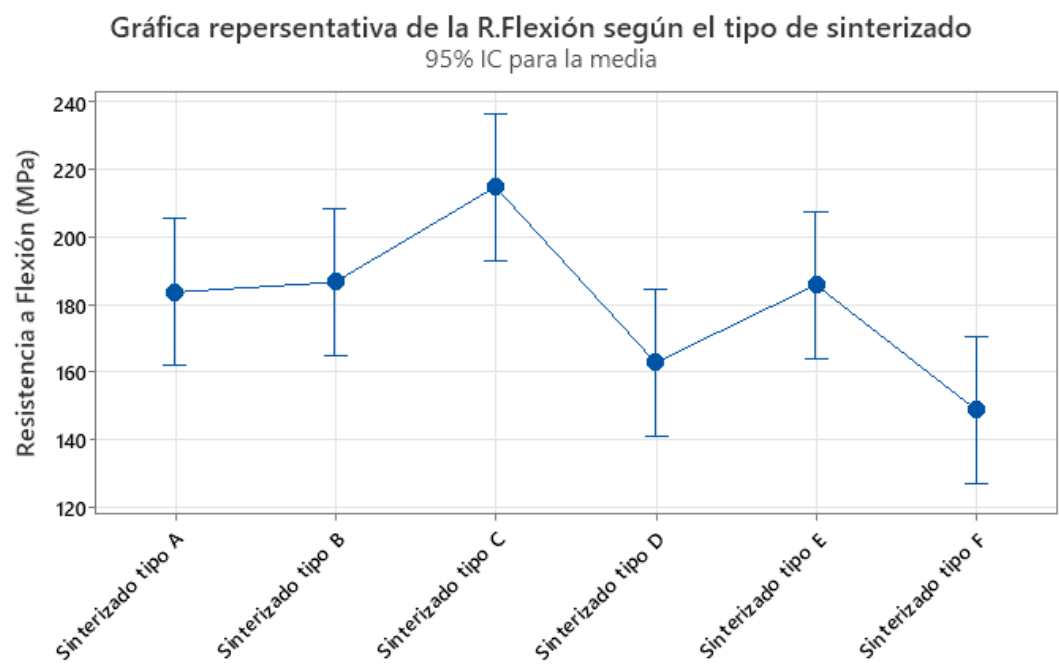
Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Sinterizado tipo A	5	183,6	27,2	(160,7; 206,5)
Sinterizado tipo B	5	186,6	26,7	(163,7; 209,5)
Sinterizado tipo C	3	216,00	1,73	(186,48; 245,52)
Sinterizado tipo D	5	162,80	19,49	(139,94; 185,66)
Sinterizado tipo E	5	185,8	24,3	(162,9; 208,7)
Sinterizado tipo F	5	148,8	30,4	(125,9; 171,7)

Desv.Est. agrupada = 24,6529

Ilustración 19. Tratamiento estadístico para R.Flexión

Tras la obtención de estos datos por parte de minitab podemos ver que las probetas con el tipo de sinterizado C son las que han obtenido los mejores de Resistencia a Flexión y menos dispersión entre probetas.



La desviación estándar agrupada se utilizó para calcular los intervalos.

Ilustración 20. Gráfica representativa de la R.Flexión según el tipo de sinterizado

5.2. Densidad

La densidad de las piezas de alúmina fabricadas mediante impresión 3D puede variar en función de varios factores, como los parámetros de impresión, el tipo de material utilizado y el diseño de la pieza.

En general, las piezas impresas en 3D tienden a tener una densidad ligeramente inferior a la del material en su forma sólida convencional. Esto se debe a la presencia de porosidad y a las características propias de los procesos de fabricación aditiva.

Específicamente, en el caso de las probetas de alúmina impresas en 3D, la densidad puede oscilar entre el 90% y el 99% de la densidad teórica del material. Es importante tener en cuenta que este rango puede variar según los parámetros de impresión utilizados y las condiciones de fabricación específicas.

Para mejorar las propiedades mecánicas y aumentar la densidad de las piezas impresas en 3D, se han empleado técnicas de postprocesamiento, como la sinterización. Este proceso implica someter las piezas a altas temperaturas para promover la consolidación de los materiales y reducir la porosidad.

Además del postprocesamiento, es posible intentar aumentar la densidad ajustando los parámetros de la impresión 3D. Existen opciones disponibles en las impresoras y en el software de laminación que brindan soluciones parciales a este problema. Una de estas soluciones consiste en aumentar el flujo de material durante la extrusión, ya que el material se comporta como un fluido y puede acomodarse mejor. Asimismo, existe la opción de utilizar software de alisado de capas, que implica realizar un pase adicional en cada capa con una cantidad mínima de material, permitiendo que la boquilla recorra todos los puntos para alisar la capa y rellenar los espacios vacíos.

También es importante tener cuidado en el almacenamiento del material de impresión de alúmina, ya que la presencia de contaminantes o humedad puede afectar la densidad final de las piezas impresas en 3D. Por lo tanto, es necesario asegurarse de almacenar y manipular el material adecuadamente para evitar su contaminación o exposición a la humedad.

Otro factor a considerar es que nuestras probetas están compuestas por polvo cerámico unido mediante un polímero. Intentamos eliminar completamente este polímero mediante un baño de acetona y un proceso de quemado. Sin embargo, esto puede generar huecos y aumentar la porosidad de nuestras probetas. Afortunadamente, durante el proceso de sinterización, es posible que este problema se resuelva en gran medida, ya que la temperatura y las contracciones permiten que los hilos se recolquen, eliminando los huecos inherentes a la impresión FDM.

5.2.1. Descripción de ensayo

En base a la Normativa EN 1389:2003, se ha utilizado como punto de partida para estos ensayos. Dicha normativa, titulada "Cerámicas técnicas avanzadas. Cerámicas compuestas. Propiedades físicas. Determinación de la densidad y porosidad aparente", establece dos métodos para calcular la densidad. En este caso, se ha optado por seguir el procedimiento B, que implica llevar a cabo tres tipos de mediciones:

- Pesada en seco

Inicialmente se llevará a cabo una pesada utilizando el material en su estado completamente seco asegurándose de que esté libre de cualquier contenido de humedad. Es necesario secar las muestras en una estufa a una temperatura de 110°C (con una variación máxima de $\pm 5^\circ$) hasta que, al realizar dos pesadas consecutivas con un intervalo mínimo de 2 horas entre ellas, no se observen diferencias en los resultados obtenidos.[19]

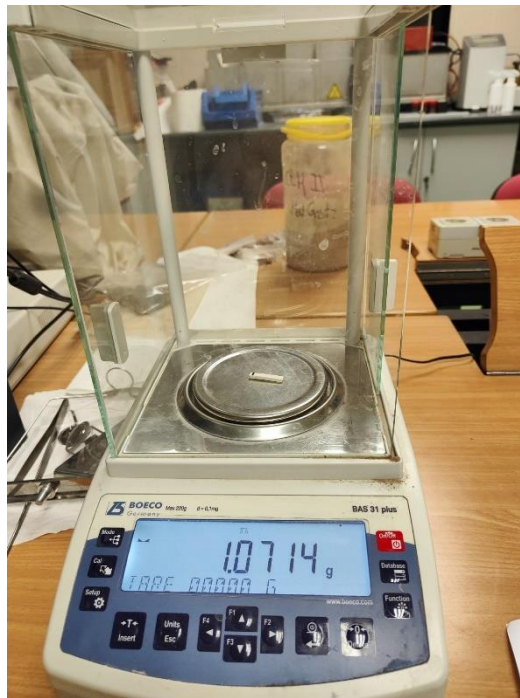


Ilustración 21. Proceso de pesada en seco

- Pesada saturada en el aire

Para esta pesada debemos sumergir nuestras probetas en agua destilada y aplicar un vacío sobre ellas durante 15 minutos. Con esto podemos rellenar los poros de agua ya que con el vacío obtenemos una mayor impregnación ya que se desaloja mejor el aire. [19]

Después de realizar este proceso secamos superficialmente los restos de agua destilada de nuestras probetas y las pesamos como si fuera en seco.



Ilustración 22. Proceso de saturación de aire

- Pesada hidrostática de la pieza impregnada en vacío

Esta es la última pesada que realizaremos, esta vez pesaremos nuestras probetas sumergidas en agua destilada para obtener la fuerza de empuje de la probeta y así obtener la densidad y porosidad utilizando las tres medidas [19]

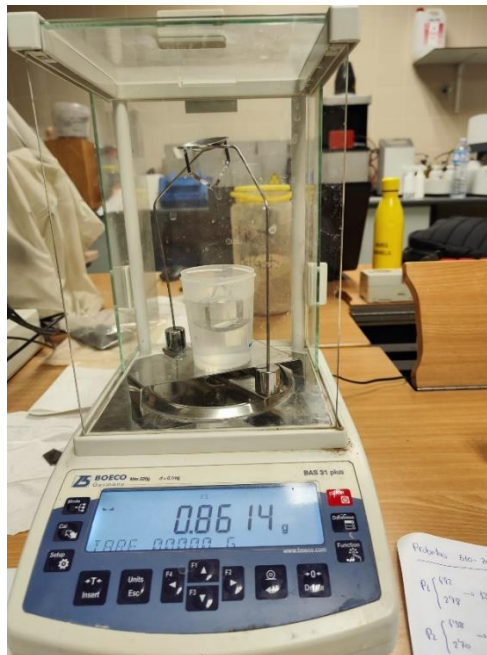


Ilustración 23. Proceso pesado hidrostático

5.2.2 Resultados de los ensayos y tratamiento estadístico.

Al igual que en el ensayo de resistencia a flexión, vamos a usar Minitab para el tratamiento de los datos.

Estos datos nos pueden ayudar a entender mejor los resultados anteriores ya que en teoría a mayor densidad mejor tienen que ser los resultados de Resistencia a Flexión, aunque hay varios factores que pueden variar esto, por ejemplo, si la grieta se encuentra con un poro, esto puede frenar su avance y así obtener mejores resultados.

Los resultados arrojados para la densidad por el programa, utilizando de base los datos del Anexo II, son los siguientes:

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	5	0,08941	0,017882	7,19	0,000
Error	24	0,05970	0,002488		
Total	29	0,14911			

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0,0498762	59,96%	51,62%	37,44%

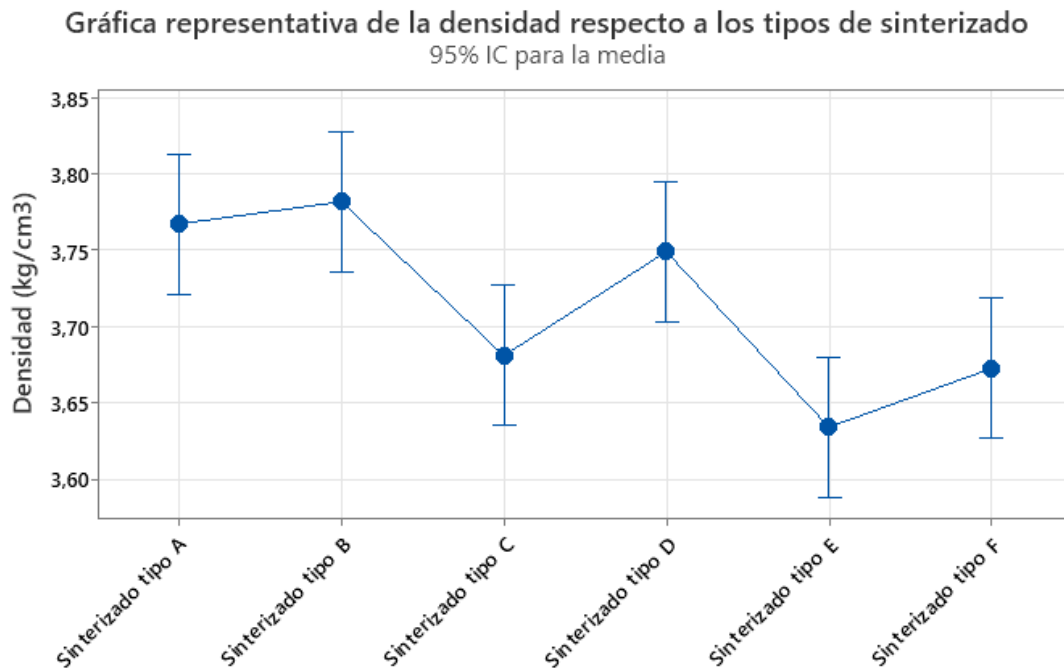
Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Sinterizado tipo A	5	3,7675	0,0329	(3,7215; 3,8136)
Sinterizado tipo B	5	3,7821	0,0359	(3,7360; 3,8281)
Sinterizado tipo C	5	3,68118	0,02045	(3,63514; 3,72722)
Sinterizado tipo D	5	3,7493	0,0268	(3,7033; 3,7953)
Sinterizado tipo E	5	3,6343	0,0756	(3,5882; 3,6803)
Sinterizado tipo F	5	3,6727	0,0755	(3,6267; 3,7188)

Desv.Est. agrupada = 0,0498762

Ilustración 24. Tratamiento estadístico para densidad

Podemos ver que los mejores resultados son los del tipo de sinterizado B, si nos ponemos a recordar la fabricación de estas probetas, podemos observar que este tipo de sinterizado partía de nuestra variante de quemado, donde no dejamos enfriar la probeta después de este y pasamos directamente al sinterizado.



La desviación estándar agrupada se utilizó para calcular los intervalos.

Ilustración 25. Gráfica representativa de la densidad según el tipo de sinterizado

También podemos observar que menos las probetas que su sinterizado llega a 1550°C, para las demás, el quemado mas óptimo es el que nos recomienda el fabricante.

Usando estos mismos datos, también podemos obtener el porcentaje de porosidad de nuestras probetas.

Los resultados arrojados para el porcentaje de porosidad por el programa, utilizando de base los datos del Anexo II, son los siguientes:

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	5	3,845	0,7690	1,40	0,261
Error	24	13,216	0,5507		
Total	29	17,061			

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0,742061	22,54%	6,40%	0,00%

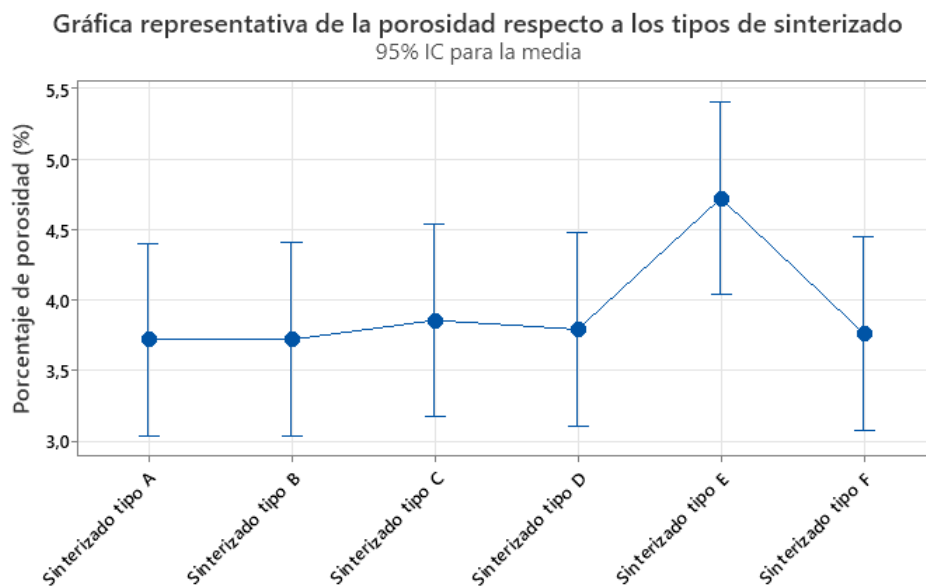
Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Sinterizado tipo A	5	3,720	0,729	(3,035; 4,405)
Sinterizado tipo B	5	3,722	0,501	(3,037; 4,407)
Sinterizado tipo C	5	3,858	0,583	(3,173; 4,543)
Sinterizado tipo D	5	3,794	0,923	(3,109; 4,479)
Sinterizado tipo E	5	4,724	0,895	(4,039; 5,409)
Sinterizado tipo F	5	3,764	0,727	(3,079; 4,449)

Desv.Est. agrupada = 0,742061

Ilustración 26. Tratamiento estadístico para la porosidad

Podemos ver como estos datos son coherentes respecto a la densidad como los grupos con mas porosidad son los sinterizados de tipo C y E que corresponden con los grupos con menos densidad.



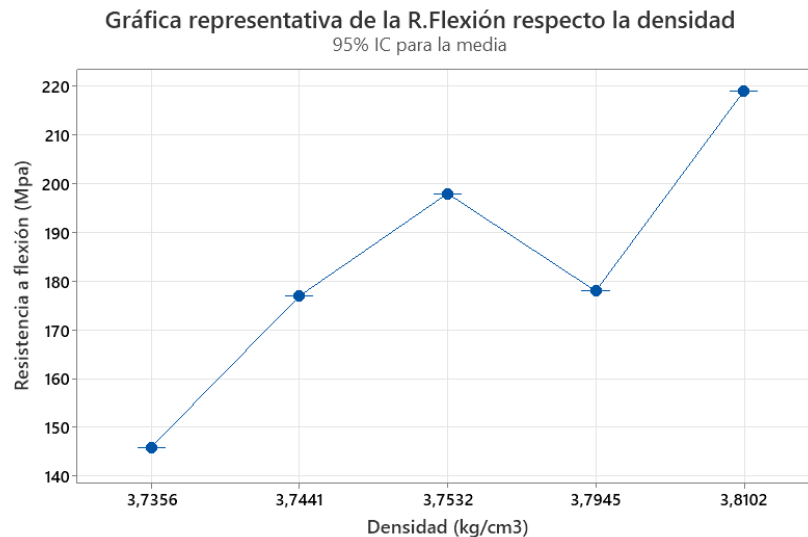
La desviación estándar agrupada se utilizó para calcular los intervalos.

Ilustración 27. Gráfica representativa de la porosidad según el tipo de sinterizado

5.3 Comparación entre los ensayos de resistencia a flexión y densidad

En este punto vamos a comparar la resistencia a flexión de las probetas respecto a su densidad para cada sinterizado.

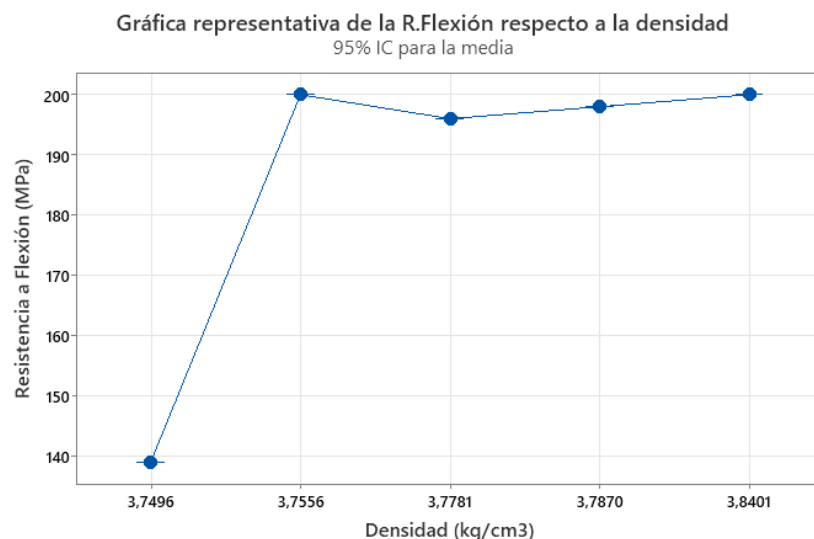
- Sinterizado tipo A



La desviación estándar agrupada se utilizó para calcular los intervalos.

Ilustración 28. Gráfica representativa de la R.Flexión respecto a la densidad para el tipo de sinterizado A

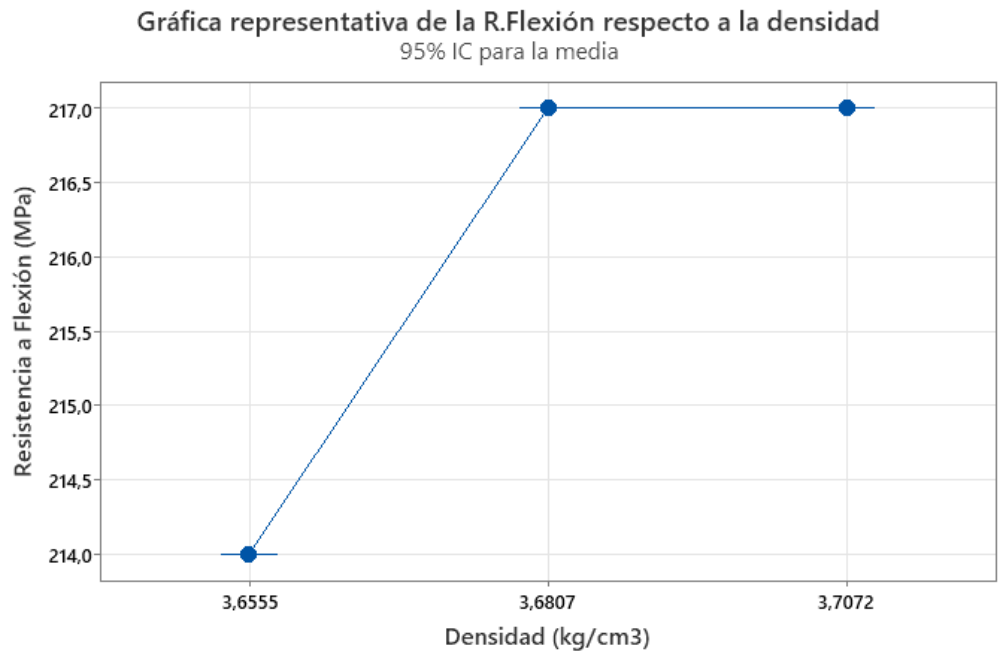
- Sinterizado tipo B



La desviación estándar agrupada se utilizó para calcular los intervalos.

Ilustración 29. Gráfica representativa de la R.Flexión respecto a la densidad para el tipo de sinterizado B

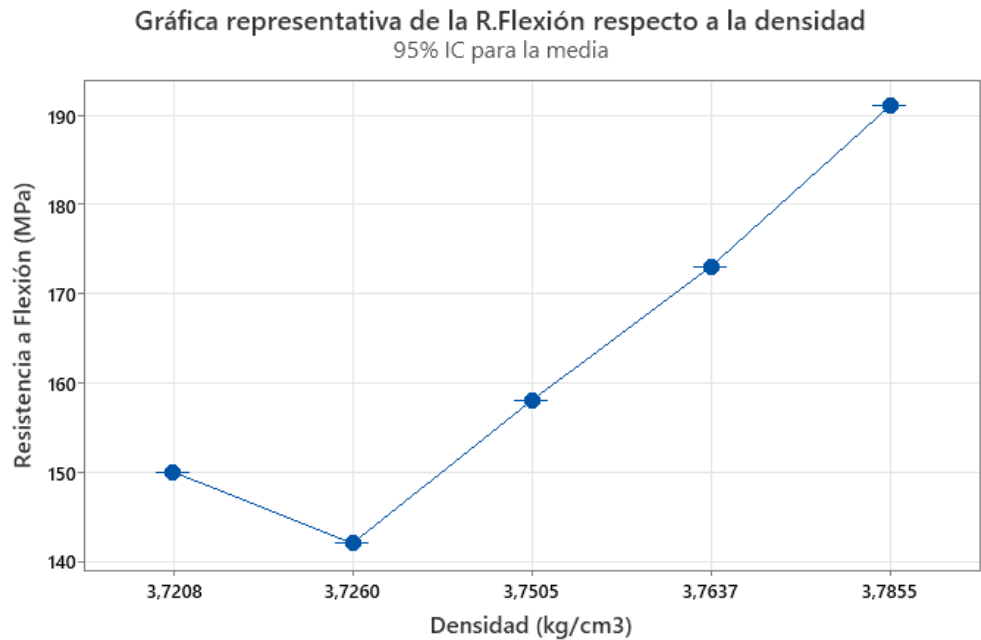
- Sinterizado tipo C



La desviación estándar agrupada se utilizó para calcular los intervalos.

Ilustración 30. Gráfica representativa de la R.Flexión respecto a la densidad para el tipo de sinterizado C

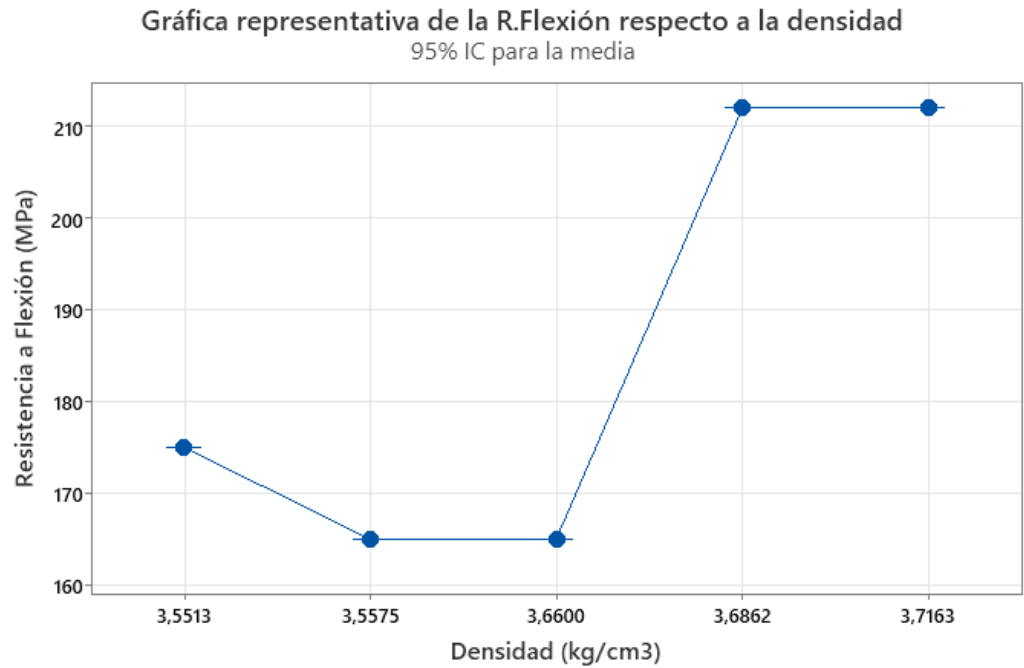
- Sinterizado tipo D



La desviación estándar agrupada se utilizó para calcular los intervalos.

Ilustración 31. Gráfica representativa de la R.Flexión respecto a la densidad para el tipo de sinterizado D

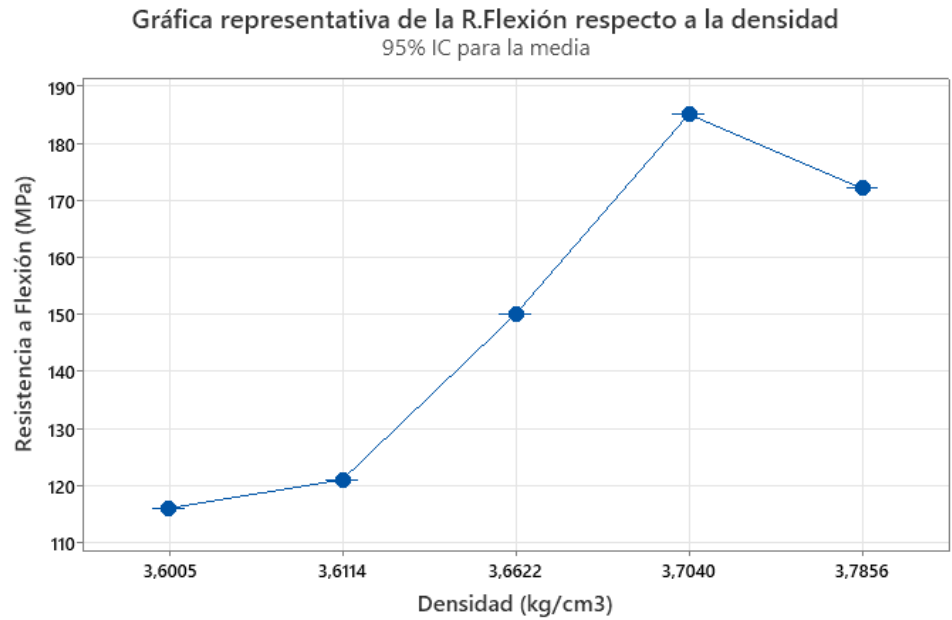
- Sinterizado tipo E



La desviación estándar agrupada se utilizó para calcular los intervalos.

Ilustración 32. Gráfica representativa de la R.Flexión respecto a la densidad para el tipo de sinterizado E

- Sinterizado tipo F



La desviación estándar agrupada se utilizó para calcular los intervalos.

Ilustración 33. Gráfica representativa de la R.Flexión respecto a la densidad para el tipo de sinterizado F

6. Conclusiones

Tras obtener todos los datos podemos ver en la ilustración que las probetas con mejor resistencia a flexión son las de tipo C, con una media de 216 MPa. Esto, es contradictorio ya que este grupo de probetas tiene poca densidad y bastante porosidad respecto a otros grupos que podemos ver en las ilustraciones con una media de densidad y porosidad de 3,68118 kg/cm³ y 3,86%.

En el caso del ensayo a flexión de las probetas con sinterizado tipo C hubo anomalías con dos de ellas como se puede apreciar en la Tabla de resultados I. Estas probetas tuvieron un mal comportamiento en este ensayo ya que obtuvieron resultados de 41 MPa y 54 Mpa.

Estas probetas se obviaron en el estudio estadístico ya que tienen resultados con demasiada variación respecto a las otras tres, con una media de 216 MPa.

Esto puede haber ocurrido debido a que este grupo de probetas (Tipo C) tienen mayor porosidad respecto a los demás a la media de los otros grupos, esto puede causar que a la hora de la propagación de la grieta en el ensayo de resistencia a flexión se pueda ver frenada por estos poros o, por otro lado, estos poros favorezcan a la propagación de esta como hemos podido ver en los dos casos expuestos anteriormente.

Como en el caso de las probetas con sinterización tipo C dependen en gran medida de la distribución de los poros, no vamos a elegirlo como el sinterizado idóneo para este material.

Visto este problema he realizado una comparación de la resistencia a flexión respecto a la densidad de estas para cada una de los sinterizados como se pueden ver en las ilustraciones 25,26,27,28,29 y 30. En este caso y estudiando las probetas por separado en cada procedimiento, podemos observar unos resultados muy coherentes ya que, en la mayoría de las probetas estudiadas, a mayor densidad, mayor es la resistencia a flexión de estas.

Por todo esto hay dos sinterizados con grandes características. El sinterizado tipo A (el recomendado por el fabricante) y el sinterizado tipo B con una resistencia a flexión de 183,6 MPa y 186,6 Mpa respectivamente. En el caso de la densidad también tiene unos resultados muy similares de 3,7675 y 3,7821 kg/cm³. En estos sinterizados se ha llegado a una temperatura final de sinterizado de 1550°C los demás sinterizados, han tenido una temperatura final de 1500°C como se puede observar en la tabla 6. Este incremento de temperatura ha sido decisivo ya que ha ayudado a obtener una mayor densidad y menor porosidad y un mejor ordenamiento de las moléculas de nuestro material.

Entendiendo todo esto, el sinterizado tipo B ha obtenido los mejores resultados. También este tipo de sinterizado es más óptimo que el que el tipo A, ya que, usamos nuestra alternativa de quemado en la que ahorramos tiempo y dinero al no dejar enfriar las probetas después de este proceso y empezar nuestro sinterizado desde una temperatura de 510°C, en vez partir de temperatura ambiente.

Referencias

- [1] '*Impresión 3D de materiales cerámicos.* - Juan Ramón Marín Rueda'
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=310591>
- [2] '*Materiales para impresión 3D: guía de propiedades y aplicaciones.*'
-Sicnova
<https://sicnova3d.com/blog/experiencias-3d/materiales-para-impresion-3d-guia-de-propiedades-y-aplicaciones/>
- [3] '*10 años de impresión cerámica en 3D: IDTechEx habla de su futuro.*' - covertronic
<https://convertronic.net/noticias/tecnologia/9910-10-anos-de-impresion-ceramica-en-3d-idtechex-habla-de-su-futuro.html>
- [4] '*Guía sobre tolerancias, fiabilidad y precisión en la impresión 3D.*' -formlabs
<https://formlabs.com/es/blog/precision-fiabilidad-tolerancia-impresion-3d/>
- [5] '*¿Por qué la impresión en 3D es tan lenta y cómo puedo hacerla más rápida?*' - Descubrearduino
<https://descubrearduino.com/impresion-3d-mas-rapida/>
- [6] '*Ahorrar gastos con la impresión 3D es la solución.*' -Antonio Regidor
<https://www.impresion3daily.es/ahorrar-gastos-con-la-impresion-3d-es-la-solucion/>
- [7] '*Guía de impresión 3D mediante sinterizado selectivo por láser (SLS).*' -formlabs
<https://formlabs.com/es/blog/que-es-sinterizado-selectivo-laser/>
- [8] '*Guía completa: fusión por haz de electrones, ¿te explicamos todo!*'
-Susana. S
<https://www.3dnatives.com/es/fusion-por-haz-de-electrones-les-explicamos-todo/>
- [9] '*Guía definitiva sobre impresión 3D por estereolitografía (SLA).*' -formlabs
<https://formlabs.com/es/blog/guia-definitiva-estereolitografia-sla-impresion-3d/>
- [10] '*Impresión 3D de cerámica: ¿Una revolución dentro de la fabricación aditiva?*' - 3dnatives.com
<https://oap.ingeniariak.eus/2019/05/08/impresion-3d-de-ceramica-una-revolucion-dentro-de-la-fabricacion-aditiva/>
- [11] '*Impresión 3d con cerámica técnica.*' -beamler

<https://www.beamler.com/es/impresion-3d-con-ceramica-tecnica/>

[12] 'MATERIALES AVANZADOS EN FABRICACIÓN ADITIVA'. -Jon Iker Legarreta García

<https://es.linkedin.com/pulse/materiales-avanzados-en-fabricacion-aditiva-jon-iker-legarreta-garcia>

[13] 'Zetamix Alúmina'. -filament2print

<https://filament2print.com/es/metalicos-ceramicos/1464-zetamix-alumina.html>

[14] 'Ultimaker S5 technical specifications'. - Ultimaker

<https://ultimaker.com/es/3d-printers/ultimaker-s5>

[15] 'MTS Insight 5 Material Testing System'

<https://www.sdstate.edu/mechanical-engineering/metlab/mts-insight-5-material-testing-system>

[16] 'Boeco | BAS 31 PLUS'. -biomedical

https://biomedical.pe/catalogo/index.php?id_product=85&rewrite=boeco-bas-31-plus&controller=product&id_lang=1 .

[17] 'Tabla de Análisis de varianza de ANOVA de un solo factor'. - Soporte de Minitab® 21

<https://support.minitab.com/es-mx/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/anova/how-to/one-way-anova/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/analysis-of-variance-table/>

[18] 'EN 843-1:2006: Cerámicas técnicas avanzadas. Cerámicas monolíticas. Propiedades mecánicas a temperatura ambiente. Parte 1: Determinación de la resistencia a flexión.'

[19] 'EN 1389:2003 Cerámicas técnicas avanzadas. Cerámicas compuestas. Propiedades físicas. Determinación de la densidad y porosidad aparente'

Tablas de resultados

Tabla de resultados 1. Ensayo de flexión.

Ensayo de resistencia a flexión						
Tipo de sinterizado	Número de probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)	R.Flexión (Mpa)	Promedio (Mpa)	Desviación
A	1	4,44	2,83	178	183,6	27,2
	2	4,35	2,84	146		
	3	4,35	2,92	198		
	4	4,46	2,78	219		
	5	4,39	2,9	177		
B	1	4,35	2,85	200	186,6	26,7
	2	4,47	2,74	139		
	3	4,32	2,86	200		
	4	4,31	2,89	198		
	5	4,32	2,88	196		
C	1	4,42	2,78	217	216	1,73
	2	4,38	2,7	41		
	3	4,3	2,83	54		
	4	4,39	2,91	214		
	5	4,27	2,91	217		
D	1	4,31	2,93	158	162,8	19,49
	2	4,47	2,74	191		
	3	4,47	2,74	173		
	4	4,3	2,92	142		
	5	4,42	2,86	150		
E	1	4,42	2,78	175	185,8	24,3
	2	4,38	2,7	165		
	3	4,3	2,83	212		
	4	4,27	2,91	165		
	5	4,39	2,91	212		
F	1	4,47	2,74	150	148,8	30,4
	2	4,47	2,74	185		
	3	4,31	2,93	116		
	4	4,3	2,92	121		
	5	4,42	2,86	172		

Tabla de resultados 2. Ensayo de densidad.

Ensayo densidad (kg/cm ³)							
Tipo de sinterizado	Número de probeta	Masa seca (g)	Masa saturada (g)	Masa hidrostática (g)	Densidad (kg/cm ³)	Promedio densidad (kg/cm ³)	Desviación
A	1	1,0879	1,0971	0,8104	3,7945	3,7675	0,0329
	2	1,0385	1,0517	0,7737	3,7356		
	3	1,0813	1,918	0,8037	3,7532		
	4	1,0444	1,0524	0,7783	3,8102		
	5	1,0476	1,0591	0,8427	3,7441		
B	1	1,0211	1,0288	0,7639	3,8401	3,7821	0,0359
	2	1,162	1,1761	0,8662	3,7496		
	3	1,0711	1,0826	0,7974	3,7556		
	4	1,1009	1,1114	0,8207	3,787		
	5	1,1376	1,1504	0,8493	3,7781		
C	1	1,0714	1,0835	0,7945	3,7072	3,6811	0,02045
	2	1,1659	1,1772	0,8616	3,6942		
	3	1,1383	1,1494	0,8459	3,6683		
	4	1,0963	1,1106	0,8123	3,6555		
	5	1,116	1,1242	0,8218	3,6807		
D	1	1,0434	1,0549	0,7767	3,7505	3,7493	0,0268
	2	1,0607	1,0716	0,7914	3,7855		
	3	1,0906	1,1024	0,8112	3,7637		
	4	1,1331	1,1468	0,8427	3,726		
	5	1,0556	1,0687	0,784	3,7208		
E	1	1,0505	1,0665	0,7707	3,5513	3,6343	0,0756
	2	1,074	1,0912	0,7876	3,5575		
	3	1,0651	1,0748	0,7882	3,7163		
	4	1,0154	1,0278	0,7505	3,66		
	5	1,055	1,0685	0,7823	3,6862		
F	1	1,1408	1,1504	0,8389	3,6622	3,6727	0,0755
	2	1,169	1,1797	0,8641	3,704		
	3	1,1709	1,1841	0,8589	3,6005		
	4	1,0744	1,089	0,7915	3,6114		
	5	1,0633	1,0687	0,7864	3,7856		

Tabla de resultados 3. Ensayo de porosidad.

Ensayo porosidad (%)							
Tipo de sinterizado	Número de probeta	Masa seca (g)	Masa saturada (g)	Masa hidrostática (g)	Porosidad (%)	Promedio porosidad (%)	Desviación
A	1	1,0879	1,0971	0,8104	3,2	3,72	0,729
	2	1,0385	1,0517	0,7737	4,74		
	3	1,0813	1,918	0,8037	3,64		
	4	1,0444	1,0524	0,7783	2,91		
	5	1,0476	1,0591	0,8427	4,11		
B	1	1,0211	1,0288	0,7639	2,89	3,722	0,501
	2	1,162	1,1761	0,8662	4,01		
	3	1,0711	1,0826	0,7974	4,03		
	4	1,1009	1,1114	0,8207	3,61		
	5	1,1376	1,1504	0,8493	4,07		
C	1	1,0714	1,0835	0,7945	4,18	3,858	0,583
	2	1,1659	1,1772	0,8616	3,58		
	3	1,1383	1,1494	0,8459	3,57		
	4	1,0963	1,1106	0,8123	4,71		
	5	1,116	1,1242	0,8218	3,25		
D	1	1,0434	1,0549	0,7767	4,13	3,794	0,923
	2	1,0607	1,0716	0,7914	3,89		
	3	1,0906	1,1024	0,8112	2,19		
	4	1,1331	1,1468	0,8427	4,5		
	5	1,0556	1,0687	0,784	4,26		
E	1	1,0505	1,0665	0,7707	5,4	4,724	0,895
	2	1,074	1,0912	0,7876	5,66		
	3	1,0651	1,0748	0,7882	3,38		
	4	1,0154	1,0278	0,7505	4,47		
	5	1,055	1,0685	0,7823	4,71		
F	1	1,1408	1,1504	0,8389	3,08	3,764	0,727
	2	1,169	1,1797	0,8641	3,39		
	3	1,1709	1,1841	0,8589	4,05		
	4	1,0744	1,089	0,7915	4,9		
	5	1,0633	1,0687	0,7864	3,4		