



**Obtención de morfologías TPMS a partir  
de la impresión 3D en arcilla.**

SOFIA GÓMEZ ECHEVERRI  
SOFIA HERNÁNDEZ URIBE

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE ARQUITECTURA Y DISEÑO  
FACULTAD DE DISEÑO INDUSTRIAL  
PROGRAMA DE DISEÑO INDUSTRIAL  
MEDELLÍN  
2024

# **Obtención de morfologías TPMS: a partir de la impresión 3D en arcilla**

SOFIA GÓMEZ ECHEVERRI  
SOFIA HERNÁNDEZ URIBE

Trabajo de grado para optar al título de Diseñador Industrial

Asesor

ALEJANDRO ALBERTO ZULETA GIL

Doctor (PhD) en Ingeniería

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE ARQUITECTURA Y DISEÑO  
FACULTAD DE DISEÑO INDUSTRIAL  
PROGRAMA DE DISEÑO INDUSTRIAL  
MEDELLÍN  
2024

# Obtención de morfologías TPMS: a partir de la impresión 3D en arcilla.

Sofía Gómez Echeverri, Sofía Hernández Uribe

Facultad de Diseño Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana, Sede Medellín, Circular 1 N° 70-01, Medellín, Colombia

## Resumen

En los últimos años la impresión 3D ha presentado diferentes estudios e innovaciones en cuanto a materiales arcillosos, los cuales no han sido estudiados en profundidad debido a las dificultades que se presentan a la hora de realizar las impresiones. Particularmente en lo relacionado a la impresión 3D de este tipo de materiales desde el diseño industrial, se ha enfocado más en abordar asuntos estéticos que estructurales/funcionales. Lo que se busca con este proyecto es realizar una propuesta de diseño con base a la investigación de las propiedades que se dan a partir del uso de las superficies mínimas triplemente periódicas (TPMS) aplicadas en la superficie o estructura de productos utilizados en la vida cotidiana, con el objetivo de obtener las mejores condiciones para su modelado a partir de impresión 3D, brindando la posibilidad de favorecer su uso y resistencia. Esta investigación está enfocada en la determinación de los parámetros de estructuras TPMS, además, de determinar su comportamiento mecánico específico. Obteniendo como resultado un prototipo de estas estructuras quemadas en arcilla.

Palabras clave: Impresión 3D en cerámica; Superficies Mínimas Triplemente Periódicas (TPMS); Propiedades mecánicas; Análisis por elementos finitos (FEA).

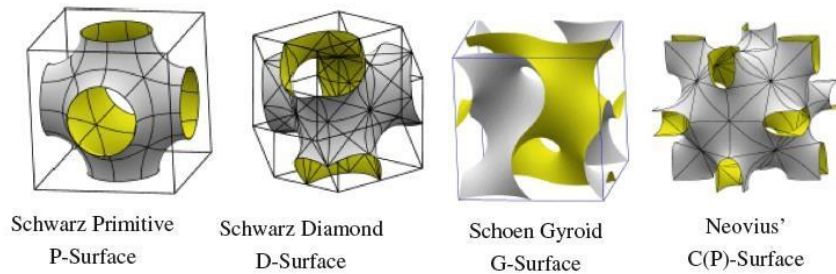
## 1. Introducción

Actualmente, la impresión 3D en arcilla presenta pocos estudios sobre sus posibles aplicaciones y de lo que ofrecen sus métodos de fabricación en acabados, tiempos, sostenibilidad, diseño de geometrías complejas, resistencia, etc. Por eso, este trabajo de investigación aborda las condiciones para la obtención de piezas impresas en arcilla con estructuras Superficies Mínimas Triplemente Periódicas (TPMS). Hemos encontrado que desde el diseño se pueden desarrollar productos que con la adaptación de la morfología brinden un mejor agarre y creen autonomía en las personas con patologías de la mano que afectan su cotidianidad; por ende, este proyecto de investigación busca implementar las estructuras TPMS en diseños cerámicos convencionales a nivel funcional, con el fin de identificar cuál de estas estructuras favorece la aislación térmica de superficies y a su vez mantiene una relación resistencia/peso similar o mejor.

Las estructuras TPMS son definidas matemáticamente como estructuras que se repiten en 3 dimensiones con curvaturas medias de 0 y con superficies más largas. Es decir, que la suma de sus principales curvaturas en cada punto es cero donde las dos principales tienen signos opuestos. Esto significa que son igualmente convexas y cóncavas en todos los puntos y su forma es como una silla de montar o hiperbólica. La serie de TPMS son libres de auto intersecciones y suelen presentarse como familias que pueden ser continuamente deformadas/distorsionadas entre sí, poseen tres vectores de celosía/rejilla, que son invariables al trasladarse en tres dimensiones diferentes. (Yu et al., 2019) (Yan et al., 2021).

Las primeras superficies mínimas triplemente periódicas en ser descubiertas e investigadas fueron reportadas por Schwarz (1890). Las más conocidas son la primitiva de Schwarz y el diamante de Schwarz (Yan et al., 2021). El siguiente desarrollo en las TPMS no tuvo lugar hasta 1970 cuando A. H. Schoen investigó para la NASA cuales superficies de este tipo podían ser de uso como estructuras espaciales y encontró más de una docena de ejemplos nuevos. Dichas superficies con simetría cubica son llamadas Superficies Gyroid G de Schoen (Yu et al., 2019). **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 1 Estructuras TPMS



Estas presentan mejor manufacturabilidad que las basadas en bigas, debido a que no presenta concentradores de esfuerzo en los nudos de unión por lo que el proceso de manufactura se compone de líneas continuas. Se han hecho pocos estudios sobre el uso de estas estructuras en la configuración interna de materiales arcillosos o en general, en su aplicación para el diseño de productos cerámicos funcionales, como en la impresión 3D, ha realizado desde lo estético o en lo médico siendo poco explorado en lo estructural.

Se encontraron diferentes estudios en donde se aplicaban este tipo de estructuras como en el artículo “The New Boundaries of 3D-Printed Clay Bricks Design: Printability of Complex Internal Geometries” (Sangiorgio et al., 2022) donde se realizaron estudios, pruebas y prototipado de ladrillos mejorados aplicando en su configuración interna estructuras complejas con propiedades mecánicas valiosas como las de las TPMS. También, se encontró el artículo “Application of TPMS structure in bone regeneration” (Dong & Zhao, 2021) donde con los avances de la impresión 3D se propuso utilizar las TPMS para realizar estructuras porosas para optimizar el proceso de regeneración ósea ya que además de ser fuertes mecánicamente, son capaces de imitar los tejidos óseos biológicos para integrarse con el tejido circundante mientras se da el proceso de regeneración por eso realizaron una investigación donde se puso a prueba las diferentes propiedades físicas, el diseño de los poros, la curvatura, la resistencia mecánica y la permeabilidad de las estructuras TPMS.

Las tecnologías de impresión 3D actualmente son consideradas una revolución en los procesos de fabricación. La impresión 3D es una serie de tecnologías de fabricación avanzada que se utilizan para obtención de piezas físicas de manera aditiva ya sea punto por punto, línea por línea o capa por capa a partir de modelos CAD 3D que se dividen en secciones transversales 2D. Esta permite la realización de estructuras altamente complejas y precisas que son difíciles de realizar utilizando métodos de fabricación tradicionales. Han ganado rápidamente la atención de distintas comunidades

desde su aparición en 1980. En la fabricación de componentes cerámicos, la impresión 3D ofrece posibilidades completamente nuevas para abordar los problemas y desafíos de mecanización de los materiales arcillosos que por su extrema dureza y fragilidad son extremadamente difícil de hacer mecánicamente, no solo se pueden dañar las herramientas, también es complejo obtener superficies de buena calidad y con precisión dimensional. Las tecnologías de diseño existentes para la impresión 3D de arcilla se reflejan a partir de formas sólidas diseñadas en diferentes programas que luego se convierte en una estructura compleja con un diseño único. Por el contrario, en el desarrollo manual, la forma está determinada por las acciones realizadas por las manos de un artesano a través del espacio en respuesta al material (Chen et al., 2019).

Piotr Waśniowski es un artista reconocido principalmente en plataformas de redes sociales como YouTube, Instagram y Reddit por sus intrincadas impresiones 3D en cerámica, que se basan fuertemente en patrones geométricos. Utiliza una impresora 3D de arcilla Gaia Multitool Polish y un extrusor básico de arcilla desairada. Muchas de sus obras presentan sistemas modulares que sirven como una amplia fuente de inspiración para arquitectos, especialmente para elementos de fachada. Sus publicaciones incluyen no solo fotografías de los objetos impresos, sino también capturas de pantalla de los caminos de impresión desde software CAD y videos cortos del proceso de impresión (Bourgault et al., 2023).

Por esto, en esta investigación, de tipo exploratoria y cuantitativa, se realizó un primer acercamiento a los diseños de estructuras TPMS en impresión 3D realizadas en arcilla, evaluando diferentes condiciones de procesamiento y sometiéndolo a pruebas de compresión. Este proyecto abre la puerta a la investigación de otras líneas investigativas sobre la aplicación de estructuras TPMS en impresión 3D realizadas con material cerámico en productos convencionales.

## 2. Metodología

Para este proyecto se trabajó a partir de la investigación exploratoria, la cual se utiliza cuando el problema de estudio no ha sido lo suficientemente estudiado y las condiciones existentes no son aún determinantes. En este caso, se realizó un trabajo explorativo a partir del Diseño Industrial para la elaboración de un producto cerámico que tenga una mejor relación resistencia/peso desde la aplicación de estructuras TPMS.

Se plantearon distintas fases para esta investigación:

- Fase 1: Se hizo una revisión de la literatura asociada a las estructuras de superficies mínimas triplemente periódicas y a la impresión 3D respecto a sus limitaciones, alcances al momento de imprimir los diseños e investigaciones previas realizadas. Obtención de modelos digitales de 10 x 10 x 10 cm a partir de las estructuras seleccionadas (Gyroid y Schwarz) con 2 tamaños de celdas.
- Fase 2: Se realizó una simulación por FEA para determinar la resistencia mecánica que presenta cada una de las estructuras modeladas en la fase 1. Esto permitirá definir cuál es el tamaño de celda apropiado para cada estructura TPMS y cuál presenta mejor comportamiento al momento de la simulación.



- Fase 3: Se obtuvieron piezas impresas a partir de los modelos definidos en la fase 2, variando la altura de capa y la velocidad de impresión, en dos niveles para cada una de las estructuras. Aquellas muestras que presenten el mejor comportamiento, con base al acabado y condiciones de impresión se emplearán para la obtención de las muestras que serán ensayadas a compresión.
- Fase 4: Se obtuvieron piezas quemadas en arcilla a partir de lo definido en la fase 3.



### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Selección de TPMS y modelado 3D

De la revisión de la literatura se realizó una selección de cuatro TPMS que son de las más usadas, (Sangiorgio et al., 2022),(Tabla 1) las cuales son la Gyroid, la primitiva de Schwarz, la diamante y la Split p que en distintas pruebas de investigaciones han mostrado buenos resultados en cuando a resistencia y a su vez son las más viables para la impresión 3D en arcilla gracias a su recorridos continuos y simples por capa. De estas se seleccionaron las dos que han presentado mejores resultados en ensayos mecánicos de compresión en artículos científicos siendo esta la Gyroid y la primitiva de Schwarz P las que presentan resultados más notables y similares (Yu et al., 2019).

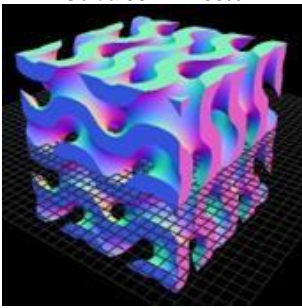
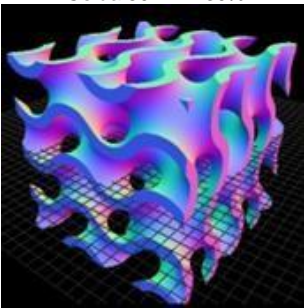
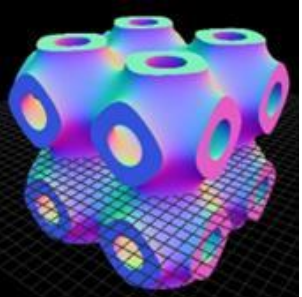
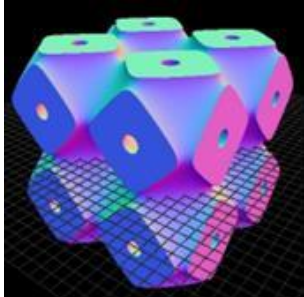
**Tabla 1** Superficies Mínimas Triplemente Periódicas (TPMS)

Tipo	Imagen	Ecuación
Gyroid		$\cos(x)+\cos(y)+\cos(z)$
Primitiva de Schwarz		$\sin(x)*\cos(y)+\sin(y)*\cos(z)+\sin(z)*\cos(x)$

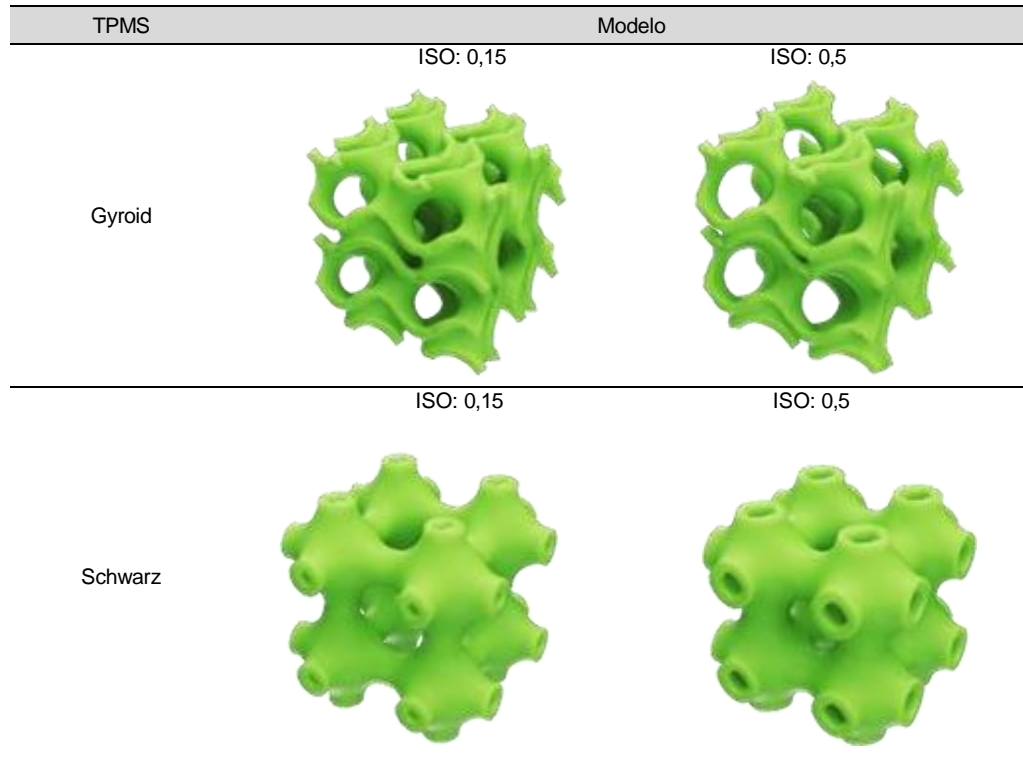
Diamante		$\begin{aligned} &\sin(x)*\sin(y)*\sin(z) \\ &+\sin(x)*\cos(y)*\cos(z) \\ &+\cos(x)*\sin(y)*\cos(z) \\ &+\cos(x)*\cos(y)*\sin(y) \end{aligned}$
Split p		$\begin{aligned} &1.1*(\sin(2*x)*\sin(z)*\cos(y) \\ &+\sin(2*y)*\sin(x)*\cos(z) \\ &+\sin(2*z)*\sin(y)*\cos(x) \\ &-0.2*(\cos(2*x)*\cos(2*y) \\ &+\cos(2*x))-0.4*\cos(2*x) \\ &+\cos(2*y)+\cos(2*z)) \end{aligned}$

Se realizaron los modelos 3D de las estructuras seleccionadas en los programas MaSMaker (Tabla 2) y Rhinoceros con Grasshopper (Tabla 3), realizando cambios en las condiciones para obtener distintas variaciones de modelos para hallar cuales eran las óptimas para la impresión 3D, buscando mantener las superficies lo más detalladas posible y optimizar la cantidad de material que se utiliza.

**Tabla 2** Modelos de estructuras TPMS realizados en MaSMaker.

TPMS	Modelo	
Gyroid	Celda 50mm - 50%	Celda 50mm - 30%
		
Schwarz	Celda 50mm - 50%	Celda 50mm - 30%
		

**Tabla 3** Modelos de estructuras TPMS realizados en Rhinoceros con Grasshopper



### 3.2. Análisis de elementos finitos a las estructuras Gyroid y Schwarz

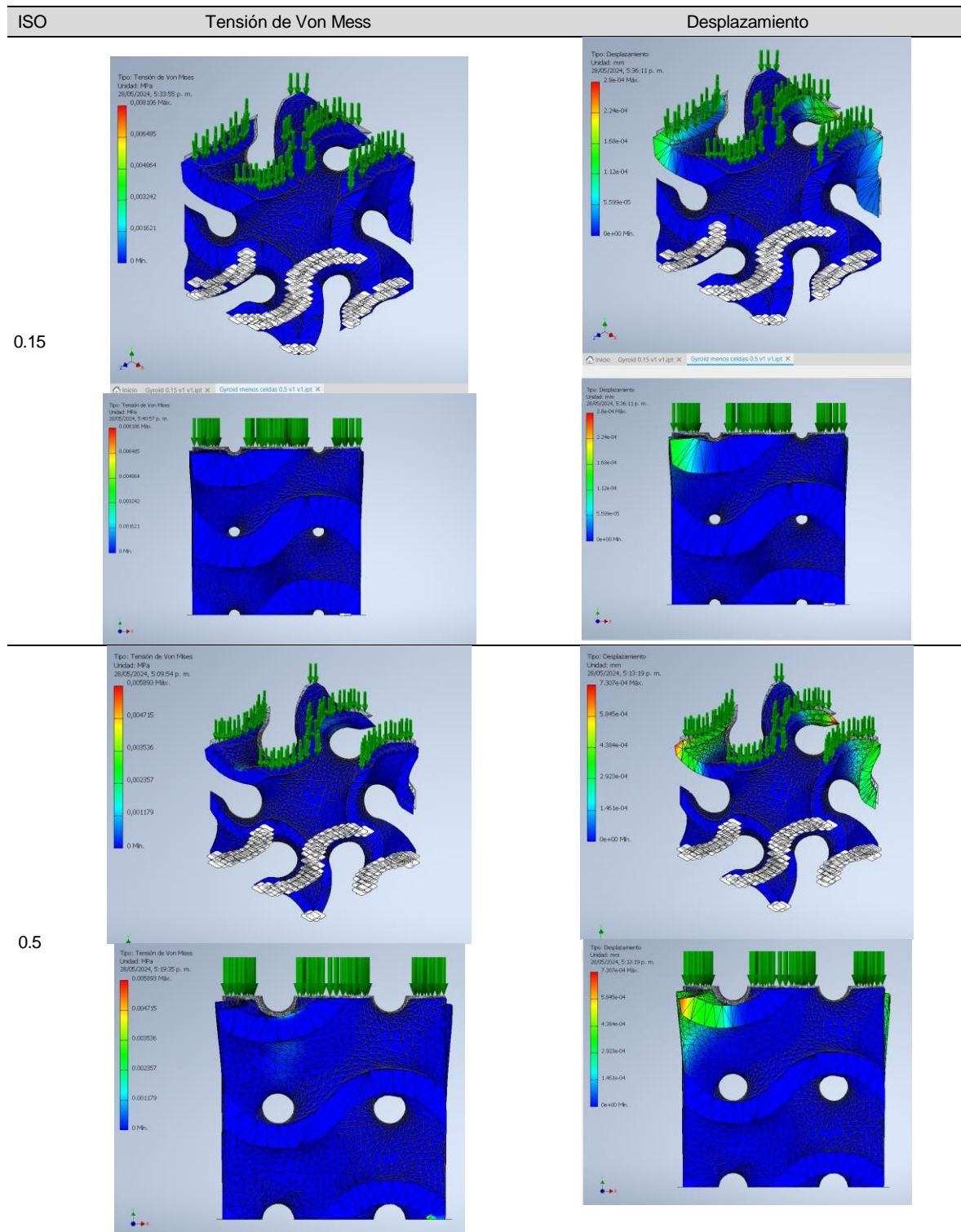
Se realizó simulaciones por FEA a las estructuras que se realizaron en la fase 1 en Rhinoceros con Grasshopper debido a que son los modelos con mejor definición y de los cuales se podían obtener las mallas necesarias para realizar el análisis. Se utilizó el programa inventor para esto, los resultados se muestran en la primera tabla para Gyroid (tabla 4) y en la segunda para la de Schwarz (tabla 5). Se utilizó el libro de “Materials and the environment: eco-informed material choice. Elsevier.” (Ashby, M. F., 2012). Para definir las características mecánicas de la arcilla para el análisis FEA.

**Figura 2** Propiedades de la arcilla según el libro "Materials of the enviroment: eco-informed material choice

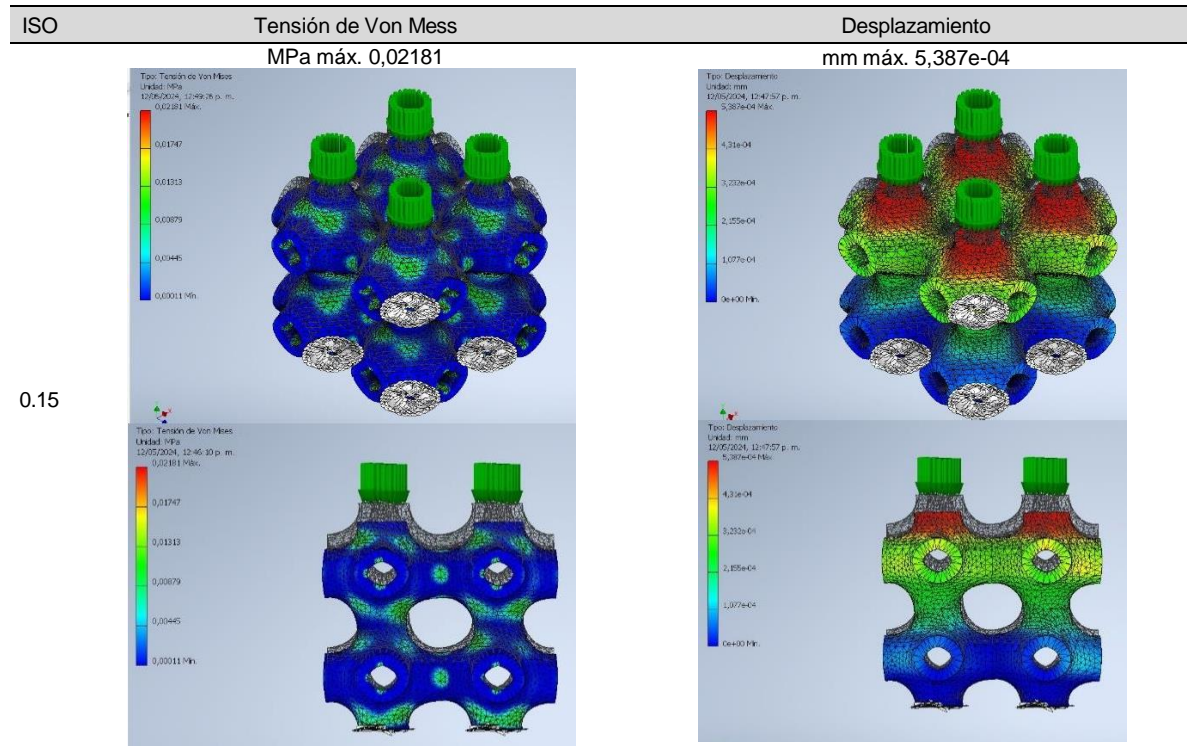
<i>Composition</i>				<b>Thermal properties</b>				
Bricks are fired clays—fine particulate aluminosilicates that derive from the weathering of rocks.				Melting point	927	–	1,230	°C
				Maximum service temperature	600	–	1,000	°C
				Thermal conductor or insulator?	Poor insulator			
				Thermal conductivity	0.46	–	0.73	W/m · K
				Specific heat capacity	750	–	850	J/kg · K
				Thermal expansion coefficient	5	–	8	µstrain/°C
<b>General properties</b>				<b>Electrical properties</b>				
Density	1,600	–	2,100	kg/m <sup>3</sup>	Good insulator			
Price	0.62	–	1.7	USD/kg	Electrical conductor or insulator?	1 × 10 <sup>14</sup> – 3 × 10 <sup>16</sup>		
					Electrical resistivity	µohm · cm		
					Dielectric constant	7 – 10		
					Dissipation factor	0.001 – 0.01		
					Dielectric strength	9 – 15		
						10 <sup>6</sup> V/m		
<b>Mechanical properties</b>								
Young's modulus	15	–	30	GPa				
Yield strength (elastic limit)	5	–	14	MPa				
Tensile strength	5	–	14	MPa				
Elongation	0	–		%				
Hardness—Vickers	20	–	35	HV				
Fatigue strength at 10 <sup>7</sup> cycles	6	–	9	MPa				
Fracture toughness	1	–	2	MPa · m <sup>1/2</sup>				

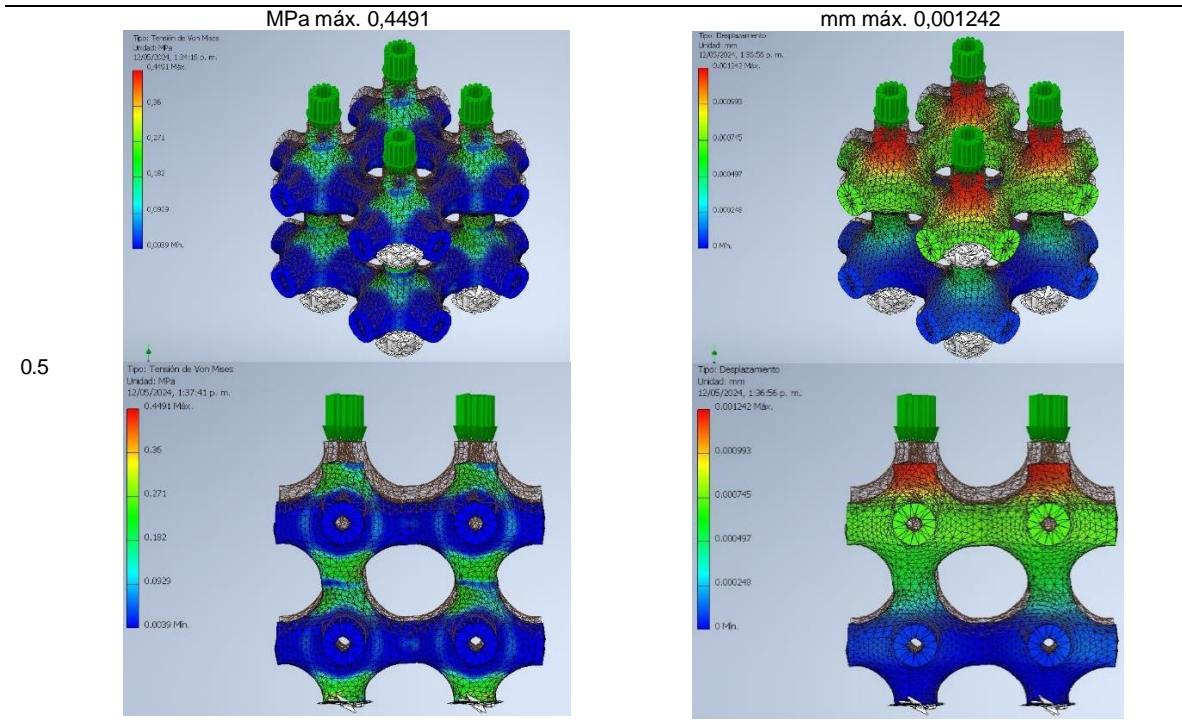


**Tabla 4** Simulación FEA para la estructura Gyroid



**Tabla 5** Simulación FEA para la estructura Schwarz

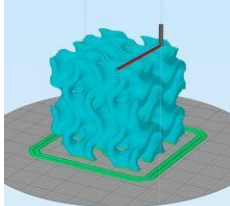


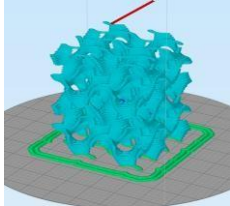
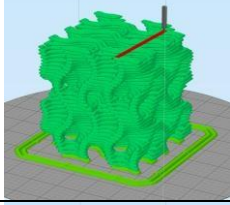
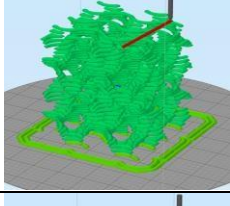
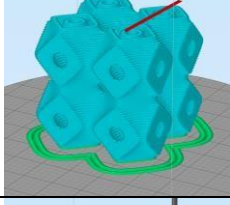
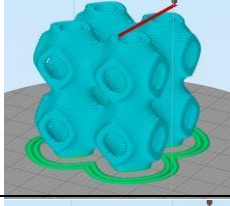
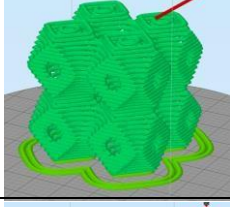
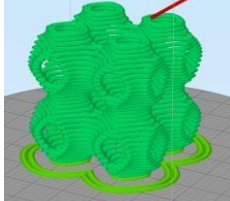


### 3.3. Preparación e impresión de modelos

Se obtendrán piezas impresas a partir de los modelos definidos en la fase 2, que en este caso se utilizaron los realizados en MaSMaker debido a que eran los que presentaban las mejores condiciones para impresión variando la altura de capa y la velocidad de impresión, en dos niveles para cada una de las estructuras utilizando un slicer para leer G-code para esto (Tabla 6). Aquellas muestras que presenten el mejor comportamiento, con base al acabado y condiciones de impresión se emplearán para la obtención de las muestras que serán ensayadas a compresión.

**Tabla 6** Configuraciones de impresión en el slicer para leer G-code para cada estructura




Categoría	Capa y velocidad	Tamaño celda y %	Resultado
Gyroid	Capa 1,5 mm Velocidad 800	50mm – 50%	 <div data-bbox="1040 1591 1300 1711"> <p>Build Statistics</p> <p>Build time: 1 hour 24 minutes            Filament length: 165.1 mm            Plastic weight: 794.28 g (1.75 lb)            Material cost: 36.54</p> </div>

	50mm – 30%		<p>Build Statistics</p> <p>Build time: 1 hour 7 minutes            Filament length: 114.8 mm            Plastic weight: 552.21 g (1.22 lb)            Material cost: 25.40</p>
Capa 3mm Velocidad 1250	50mm – 50%		<p>Build Statistics</p> <p>Build time: 0 hours 28 minutes            Filament length: 170.5 mm            Plastic weight: 820.02 g (1.81 lb)            Material cost: 37.72</p>
	50mm – 30%		<p>Build Statistics</p> <p>Build time: 0 hours 24 minutes            Filament length: 120.1 mm            Plastic weight: 577.68 g (1.27 lb)            Material cost: 26.57</p>
Capa 1,5 mm Velocidad 800	50mm – 50%		<p>Build Statistics</p> <p>Build time: 1 hour 13 minutes            Filament length: 137.7 mm            Plastic weight: 662.47 g (1.46 lb)            Material cost: 30.47</p>
	50mm – 30%		<p>Build Statistics</p> <p>Build time: 1 hour 9 minutes            Filament length: 129.9 mm            Plastic weight: 624.82 g (1.38 lb)            Material cost: 28.74</p>
Schwarz primitiva	50mm – 50%		<p>Build Statistics</p> <p>Build time: 0 hours 25 minutes            Filament length: 142.3 mm            Plastic weight: 684.61 g (1.51 lb)            Material cost: 31.49</p>
Capa 3mm Velocidad 1250	50mm – 30%		<p>Build Statistics</p> <p>Build time: 0 hours 23 minutes            Filament length: 133.4 mm            Plastic weight: 641.91 g (1.42 lb)            Material cost: 29.53</p>



Se escogieron los modelos que de acuerdo con el slicer para leer G-code se observó que tardaban entre 30min y 1 hora 30min, y los que no presentaban errores en la definición de las capas. Se imprimieron distintos modelos de las estructuras Gyroid y Schwarz haciendo cambios en la altura de capa (1,5mm y 3mm) , la velocidad (800 mm/min y 1250 mm/min) y en la cantidad de celdas (entre 2 y 4 celdas). Se utilizó una boquilla de 4,5mm y se preparó la arcilla con el 20% de agua. En la tabla 7 se evidencian los modelos que se imprimieron tanto con fallas como sin estas.

**Tabla 7** Modelos impresos en arcilla con diferentes capas de altura




Categoría	Subtemas	Resultado
Gyroid	Capa 1,5 mm	
	Capa 3mm	
Schwarz primitiva	Capa 1,5 mm	

	Capa 3mm	
--	----------	--

### 3.4. Quema del material obtenido

Se escogieron los modelos con las mejores características en cuanto a mayor acercamiento a las estructuras Gyroid y Schwarz, definición y tamaño de 10x10x10 cm y se llevaron a quema. (Tabla 8).

**Tabla 8** Modelos impresos en arcilla con diferentes capas de altura

Categoría	Subtemas	Resultado
Gyroid	Capa 1,5 m³m	
	Capa 3mm	
Schwarz primitiva	Capa 1,5 mm	



### 3.5. Ensayos de compresión

A los modelos que se les pudo realizar el proceso de quema, se les hizo un ensayo de compresión en el laboratorio de materiales de la universidad (Figura 3). Se obtuvo una tabla con la carga de compresión máxima de cada modelo (Tabla 8) y un gráfico donde se evidencia la deformación de cada modelo (Figura 5).

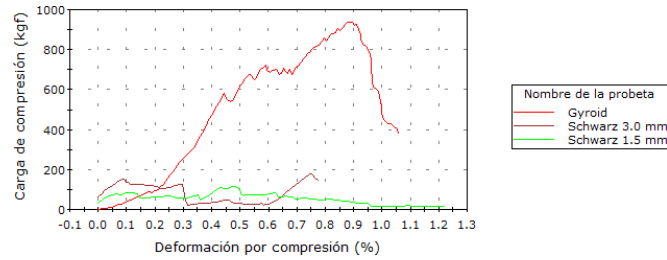
**Figura 3** Ensayos de compresión con modelos quemados



**Tabla 8** Resultados de las pruebas de compresión

	Etiqueta de la probeta	Carga de compresión Maximum Comp. load (kgf)
1	Gyroid	938.76
4	Schwarz 3.0 mm	176.21
5	Schwarz 1.5 mm	113.38
Media		409.45
Desviación estándar		459.47

**Figura 4** Gráfico de deformación durante la prueba de compresión



### 3.6. Discusión

Para la impresión 3D en arcilla se debe tener en cuenta varios factores al momento de imprimir, la composición de la arcilla, la limpieza de la máquina para que no se tapone, dejar sin la mayor cantidad de aire la arcilla cuando se introduce en el tubo de acrílico y mantener siempre las boquillas de extrusión limpias para garantizar un buen prototipo de impresión (figura 3), además se identificó que para evitar que la impresora se taponara o dejará de salir el material, debido al aire, es importante extruir la máquina para asegurar que va a salir de manera continua la arcilla.

Los prototipos impresos de las estructuras TPMS de Gyroid con celdas de 50mm-30% o 50mm-50% y Schwarz con celdas de 50mm-30% o 50mm-50%, se realizaron con una composición de 20% de agua para su mezcla con la arcilla; por otro lado, se utilizó la boquilla de la impresora 3D de 4.5 milímetros y las velocidades de los modelos variaban entre 800 y 1250 ya que entre más rápido iba la impresora era más difícil que el material se pudiera adherir a la capa inferior. Asimismo, las capas de los modelos van de 1.5 (Figura 5) a 3 (Figura 6) debido a que según esta altura la boquilla podía llegar a arrastrar el material que iba dejan a su paso si estaba demasiado abajo la capa, ya que creaba una acumulación de material seco en la boquilla, esto haciendo que dañara partes del prototipo. Los modelos que presentaron mejores resultados para la impresión fueron los que se encontraban configurados con una capa de 1,5mm con velocidad de 800mm/min; sin embargo, se demoraban el doble de tiempo en comparación con los de capa de 3mm con velocidad de 1250mm/min.

**Figura 5** Estructuras Gyroid y Schwarz impresas con una capa de 1,5mm





**Figura 6** Estructuras Gyroid y Schwarz impresas con una capa de 3mm



Los prototipos de las estructuras TPMS presentaron errores y colapsos a la hora de imprimir debido a su velocidad, la altura de capa, el tamaño de la boquilla y la composición de la arcilla (Tabla10). En el caso de los modelos presentados en la tabla 8, las estructuras de Gyroid al momento de la impresión el documento tenía una velocidad bastante rápida la cual no permitía que la arcilla se pudiera adherir correctamente a la capa inferior de esta y a los puntos, teniendo como resultado que la arcilla se regara fuera del prototipo. Por otro lado, las estructuras de Schwarz en el momento de la impresión la máquina, debido a que no se realizó la extrusión previa de la máquina, no fue continua al momento de salir la arcilla; asimismo esta estructura debido a su forma quedó con material colgando, esto es debido a que no tiene un buen soporte para soportar las capas que se realizan y la composición de la arcilla estaba un poco más líquida para los modelos finales, esto se debió posiblemente a la alta humedad presentada en el ambiente los días de ensayo, sin embargo se necesitarían más análisis futuros para corroborar esta hipótesis. (Figura 7)

Figura 7 Colapso de modelos durante el proceso de impresión



#### 4. Conclusiones

- Con este trabajo se demuestra que es posible obtener estructuras TPMS a partir de la impresión 3D en arcilla, sin embargo se requiere de un proceso de investigación y experimentación donde se deben estudiar diversas variables como tener en cuenta las características de la impresora para determinar que preciso puede ser el modelo, el tamaño de la boquilla extrusora para definir el espesor de la superficie de los modelos, la humedad del ambiente y como esta puede afectar la consistencia de la arcilla.
- En la estructura Gyroid se obtuvieron distintos resultados al variar la altura de capa y la velocidad, mientras que en el de capa de 1,5mm a 800 mm/min se obtuvo modelos estables y con buena resolución de la estructura aunque puede presentar algunos errores en las partes donde se presentan voladizos, en el de capa de 3mm a 1250 mm/min debido a que al ser más elevada y a una mayor velocidad el material no alcanzaba a unirse con la capa inferior y no generaba un apoyo firme para la siguiente capa por lo que las partes que tenían un pequeño voladizo no obtuvieron la mejor definición.
- En la estructura Schwarz, el modelo con capa de 1,5mm a 800mm/min se obtuvieron modelos definidos, compactos, resistentes debido a que la definición de las capas al no tener una velocidad muy alta, son más precisas y la arcilla se adhiere entre capas con mayor facilidad. Sin embargo, la consistencia de la arcilla hizo que al finalizar colapsara un poco la base por el peso. En el de capa de 3mm a 1250mm/min, se obtuvo modelos con resultado medianamente definido y no tan favorable, debido a que, en ciertas zonas, el material no tenía un apoyo firme, por lo que se terminaba deformando en estas partes. Sin embargo, se obtuvieron piezas con una estructura interna definida.
- Al realizar la impresión de los modelos de capa de 1,5mm, el tubo de la máquina tenía que estar completamente lleno para poder obtener el 100% de la impresión debido a que el recorrido de las boquillas se repetía en cada capa dejando doble material en cada una, esta impresión tuvo una duración de 1 hora y 30 min aproximadamente cada uno. Por otro lado, los modelos de capa de 3mm en las diferentes pruebas que se realizaron se tuvieron que

interrumpir algunos en el proceso de impresión, debido a que no se extruía la estructura de manera definida lo que no los hacía aptos para el proceso de quema y las pruebas de compresión.

- Los análisis de elementos finitos para las estructuras TPMS se deben realizar con modelos que sean sólidos, no mallas; debido a que estas últimas presentan problemas en su definición que entorpecen el proceso al dificultar su lectura en programas CAD. En cuanto a los resultados, se encontró que la estructura Gyroid posee características mecánicas más favorables que la Schwarz, sin dejar de ser los de esta también positivos, gracias a que, por su composición, las cargas de compresión se distribuyen por todo el modelo, generando así, un desplazamiento mínimo.
- En las pruebas de compresión se obtuvieron resultados más precisos y apoyaron los resultados obtenidos en los análisis FEA. La estructura Gyroid soportó 938.79 Kgf aproximadamente cinco veces más fuerza que la estructura Schwarz soportó 176.21 Kgf. Esto se debe al tipo de patrones que tiene cada una, mientras que la Gyroid tiene sus celdas distribuidas más homogéneamente, la Schwarz tiene secciones donde hay menos material, lo que la hace más frágil y probable de fracturarse y colapsar en estas zonas.

## Referencias

Bourgault, S., Wiley, P., Farber, A., & Jacobs, J. (2023). CoilCAM: Enabling Parametric Design for Clay 3D Printing Through an Action-Oriented Toolpath Programming System. *Proceedings*

of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 1–16.

<https://doi.org/10.1145/3544548.3580745>

Chen, Z., Li, Z., Li, J., Liu, C., Lao, C., Fu, Y., Liu, C., Li, Y., Wang, P., & He, Y. (2019). 3D printing of ceramics: A review. *Journal of the European Ceramic Society*, 39(4), 661–687.

<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.013>

Dong, Z., & Zhao, X. (2021). Application of TPMS structure in bone regeneration. *Engineered Regeneration*, 2, 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.engreg.2021.09.004>

Sangiorgio, V., Parisi, F., Fieni, F., & Parisi, N. (2022). The New Boundaries of 3D-Printed Clay Bricks Design: Printability of Complex Internal Geometries. *Sustainability*, 14(2), 598.

<https://doi.org/10.3390/su14020598>

Yan, C., Hao, L., Yang, L., Hussein, A. Y., Young, P. G., Li, Z., & Li, Y. (2021). Design of TPMS structures. En *Triply Periodic Minimal Surface Lattices Additively Manufactured by Selective Laser Melting* (pp. 27–38). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824438-8.00002-9>

Yu, S., Sun, J., & Bai, J. (2019). Investigation of functionally graded TPMS structures fabricated by additive manufacturing. *Materials & Design*, 182, 108021.

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108021>