

From the Vertical to the Horizontal: 3D Printing Without the Requirement of Formwork

Rocío Gaete¹, Sebastián Rozas²

¹ Universidad de Chile, Chile

rocio.gaete@ug.uchile.cl

² Universidad de Chile y GT2P, Chile

sebastianrozas@gt2p.com

Abstract. The objective of this article is to develop a methodology to print self-supporting, synclastic and anticlastic double curved surfaces tending to the horizontal from the vertical without requiring formwork. To achieve this goal the following was studied, first place, the definition, the stresses and behaviors of double curved surfaces. Second place, the performance and applications of 3D printing in the construction area, in three companies of this field. From the bibliographic review, the variables are identified to propose an algorithm to print synclastic and anticlastic surfaces in 3d. Finally, the feasibility of the method to print these types of surfaces in 3d was proven by printing four prototypes which confirmed the proper operation of the algorithm, along with showing aspects to improve at the time of printing.

Keywords: 3D Printing construction, Additive manufacturing, Layer height, Synclastic geometry, Anticlastic geometry.

1 Introducción

El área de investigación de este artículo es la impresión 3D, enfocada en la construcción. Es un tipo de manufactura aditiva que consiste en “el depósito tridimensional de compuestos fluidos de solidificación rápida, controlados digitalmente, para construir” (Martínez-Rocamora et al., 2020, p.1). Se puede extruir distintos tipos de polímeros, materiales cementicios, metales, etcétera.

En la actualidad, las investigaciones en impresión 3D se centran en aspectos técnicos, por ejemplo: optimización en los tiempos de impresión, tipos de extrusores y su precisión, de las mezclas, la reología, que Crovetto (2019) define como “el estudio de la viscosidad, plasticidad, elasticidad y derrame de la materia.” (p.7), entre otros. “Su aplicación en la industria de la construcción en concreto, aún está en su infancia. 3D Concrete Printing puede permitir la

construcción de formas libres sin el uso de encofrados costosos.” (Nematollahi et al., 2017, p.1).

Los sistemas actuales imprimen capas horizontales que se apoyan sucesivamente unas sobre otras, ascendiendo verticalmente, así imprimiendo los elementos verticales de la edificación, mientras que los horizontales como losas y/o cubiertas, son prefabricadas y se ensamblan a la impresión 3D, como las edificaciones de las empresas Icon y WASP. También se imprime sobre diferentes encofrados, algunos impresos en 3D, por ejemplo, “Encofrado impreso en 3d soluble en agua con refuerzo integrado” (Doyle y Hunt, 2019 p.1), “encofrado de membrana adaptable.” (Lim et al., 2020, p.1), entre otros.

Si bien la impresión 3D en el sentido general promete la posibilidad de fabricación de formas libres, la impresión 3D de hormigón se ha limitado en gran medida a la impresión de estructuras planas. Esto se debe al bajo límite elástico del hormigón de edad temprana que acaba de extruirse. Este bajo límite elástico evita que se imprima el hormigón que sobresale. (Lim et al., 2020, p.2)

Algunas problemáticas de imprimir geometrías curvas son: la geometría, el tiempo de secado del material, el ancho, alto y peso del cordón de impresión. Esto se enlaza al pensar en cómo imprimir una cúpula o bóveda, ya que el centro de gravedad del cordón se desplaza para imprimir la geometría, y en un momento éste queda sin apoyo de la capa anterior, ya que el ancho del cordón de impresión pierde superficie de contacto con la capa antecesora, así el material se derrama, como se ve en el cordón de superior de color rojo, en la figura 1.

La reología del material incide directamente en la impresión, pues debe ser lo suficientemente viscosa para adherirse entre capas y para no deformarse con el peso de las capas superiores, pero no lo suficientemente fluida como para desparramarse.

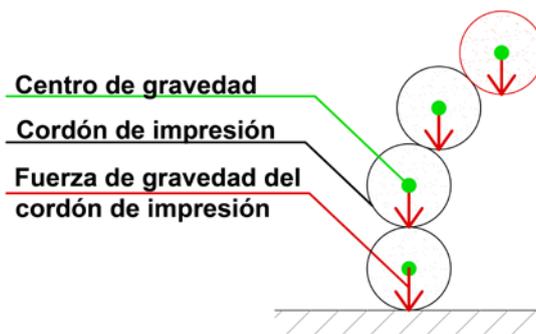


Figura 1. Diagrama de gravedad ejercida sobre cordones de impresión desplazados.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

A partir de la precisión y control de la impresión 3D, surge el desafío de cómo lograr una metodología para imprimir una superficie de doble curvatura,

sinclástica o anticlástica, sin la necesidad utilizar moldajes o de prefabricar y ensamblar los elementos horizontales de una edificación.

2 Antecedentes

2.1 Superficies: Definición, esfuerzos y comportamientos.

Gauss definió una constante k para las curvas, su valor depende de su posición en el plano cartesiano, (imagen 2). Las curvaturas de las superficies se visualizan al cortarlas con un plano. Para saber el valor total de una superficie, las constantes se multiplican, así describiendo la curvatura de las superficies. Según esta definición, dos de ellas son de interés, la primera las superficies sinclásticas, son aquellas conformadas por curvaturas que van en el mismo sentido, así obteniendo un valor de total positivo. La segunda son las superficies anticlásticas, sus curvas van en sentido contrario, positivas y negativas, por ende, resultando su valor total negativo.

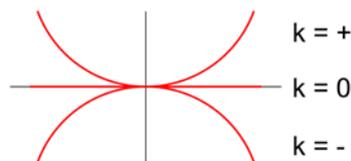


Figura 2. Valor de las constantes Gaussianas. Fuente: Elaboración propia, 2021.

Las superficies que son en todos sus puntos negativas o positivas se catalogan como no desarrollables, dicho de otro modo, “es imposible aplanarlas sin cortarlas en una serie de secciones” (Salvadori & Heller, 1987, p. 188).

Según Salvadori & Heller (1987) debido a la morfología de las cúpulas, las cargas verticales son ejercidas por su propio peso y se distribuyen bajando verticalmente (p.196).

Por otro lado, respecto a los paraboloides hiperbólicos:

La curvatura hacia arriba en dirección longitudinal confiere a la cáscara resistencia adicional, sobre todo contra el pandeo. Si la cáscara tiende a pandear, las parábolas con curvatura hacia abajo deben aplanarse; las parábolas con curvatura hacia arriba resisten esa deformación, pues sus tensiones de tracción estabilizan las tensiones de compresión en las otras. (Salvadori & Heller 1987, p.213-214)

2.2 Experiencias y aplicaciones de la impresión 3D en el área de la arquitectura: Icon, WASP y Emerging Objects.

En esta sección se presentan las tecnologías utilizadas por tres empresas: **Icon, WASP y Emerging Objects**, donde se analizarán proyectos de ellos, que permitirán visualizar cómo trabajan y han resuelto o podrían resolver problemas planteados como los de este artículo.

Tabla 1. Características de impresoras 3D. Fuente: Elaboración propia, 2021.

Empresa	Icon	WASP	Emerging
Nombre de impresora	The Vulcan II	Crane WASP	Potterbot Scara Heavy Duty
Tipo movimiento de impresora	Cartesiana	Híbrida	Brazo robótico Scara
Velocidad de impresión	13 a 18 cm/seg	30 a 50 cm/seg	3 a 10 cm/seg
Dimensión de impresión	3m x 8,5m x 21m (Alto x ancho x largo)	3m x 6,3m (Alto x diámetro)	2,74m x 6,3m (Alto x diámetro)
Cordón de impresión	30mm x 61 mm (Alto x ancho)	18 a 30 mm	6 a 50 mm
Materialidad	Lavacrete	Tierra cruda, morteros cementosos y geopolímeros	Arcilla

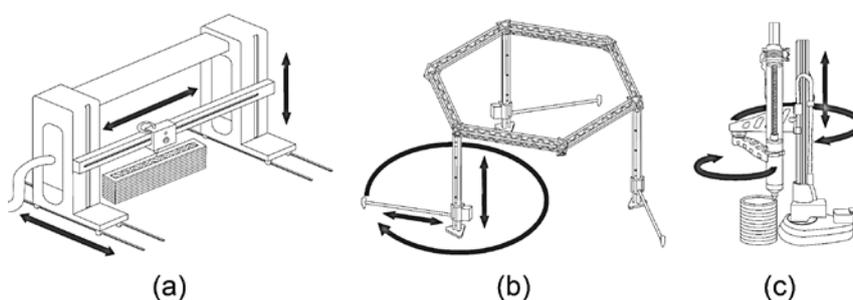


Figura 3. Diagrama de funcionamiento impresoras 3D. (a) Vulcan II, (b) Crane WASP, (c) Potterbot Scara Heavy Duty. Fuente: Elaboración propia, Adaptado de: (a) *Meet the Vulcan* [Fotografía], por Icon (<https://www.iconbuild.com/technology>). (b) *TECLA* [Fotografía], por 3d WASP (<https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/>) (c) *Scara H.D.* [Fotografía], por 3d Potter (<https://3dpotter.com/printers/scara-elite-xbpln>).

La empresa **Icon** presenta en su sitio web dos proyectos de viviendas, en ambos se imprimen sólo los muros, mientras que elementos como, puertas, ventanas, cubierta, etcétera, se instalan posterior a la impresión. Los vanos se generan con un dintel de madera, para depositar el material sobre estos. Las esquinas de las viviendas se realizan redondeadas, de esta manera, optimizar el tiempo de impresión.

Si se imprimiera un elemento que pasa desde la vertical a la horizontal, con esta tecnología, se infiere que, se puede generar una variación de alturas entre capas que ayudaría a alivianar la estructura y evitar que colapse y que esta máquina al tener un extrusor perpendicular al suelo, se llegará hasta cierto punto donde el material depositado ya no se apoya y se derrama. Esto significa que tendría un ángulo límite de impresión, que de seguirlo generaría una forma alargada, similar a un arco ojival.

WASP trabaja en el proyecto de viviendas **TECLA**, con la impresora Crane WASP que se acoplan entre ellas, generando una red de impresoras, teniendo mayor área de impresión. Este proyecto tiende a traspasar desde lo vertical a lo horizontal, y se logra parcialmente, quedando una abertura en la parte superior, puesto que la máquina interrumpe este espacio.

Se puede inferir que con Crane WASP se tendría un mejor resultado ya que las boquillas del extrusor son más pequeñas, (18 a 30 mm) hasta 3 veces más pequeñas que las de Icon, (30mm x 61 mm), aliviando así el peso de las capas. Aunque se debe considerar que el menor ancho del cordón significa que tendrá menor superficie de contacto entre capas. Esta máquina al igual que la anterior posee un extrusor perpendicular al suelo, así que el ángulo de impresión también sería limitado, pero la diferencia entre ambas es que con esta no podría cerrar la geometría.

Emerging Objects realizó el proyecto **Mud Frontiers**, es un proyecto de menor dimensiones, esto debido al rango de alcance de la impresora, que solo se limita al radio del brazo. Se puede concluir que de igual manera que Crane WASP no se podrá cerrar completamente si se desea imprimir una cúpula, ya que la máquina interfiere. Respecto a el tamaño de extrusión, está posee una menor altura lo que permitiría imprimir con mayor definición y menor peso.

3 Metodología

3.1 Introducción

Luego del primer acercamiento teórico, donde se revisó el estado del arte, se procede a la segunda etapa, desarrollo y procesos digitales, donde a partir del análisis teórico se plantean distintas variables para trabajar en un diseño computacional en Grasshopper, es decir un diseño paramétrico y asociativo.

Hudson (2010) afirma que todo diseño es paramétrico dado que es la atribución de valores a parámetros que describen a un objeto, las dimensiones y propiedades físicas que se utilizarán para su construcción. Adicionalmente, otro término alude al uso un computador para modificar automáticamente un diseño a medida que cambian valores de los parámetros. "Diseño asociativo, el usuario puede manejar y modificar la relación entre los objetos, empleando expresiones matemáticas que describen el proceso generativo de las relaciones numéricas o gráficas y en la retroalimentación entre el diseño, material y el diseñador". (Sánchez et al., 2020, p.5)

Con esto se puede decir que, el diseño paramétrico y asociativo genera la posibilidad de que a partir de un solo algoritmo generar distintos modelos digitales, al modificar los valores y/o sus parámetros.

De esta manera, a partir de los antecedentes se proponen los parámetros a trabajar. Se exploró la idea de cómo manejar el ángulo de inclinación al imprimir y se realizó un esquema (figura 4), donde se visualiza cómo al modificar la proporción de altura y ancho del cordón de impresión permite tener una mayor o menor inclinación.

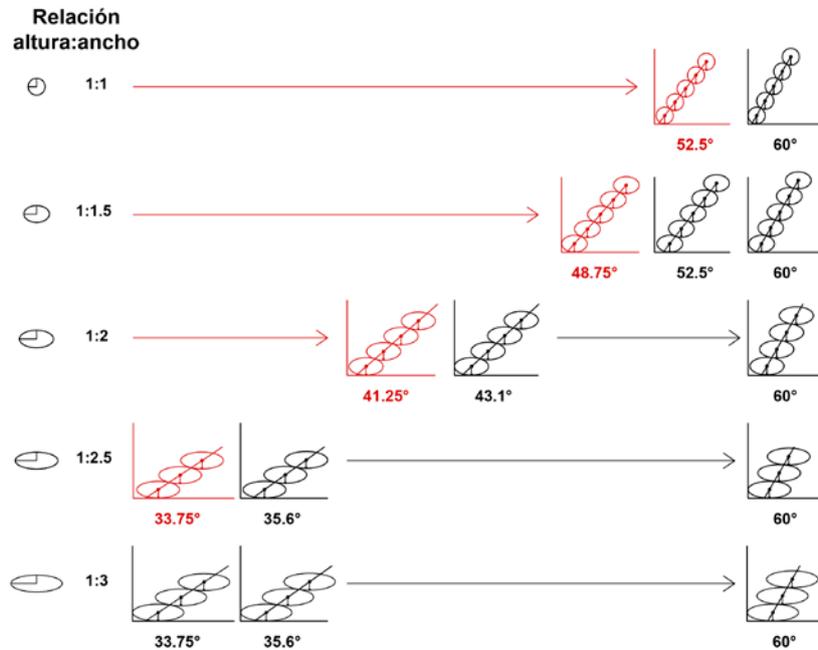


Figura 4. Esquema ángulo máximo, según relación alto:ancho del cordón. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Luego se realizó una prueba técnica en plastilina, para definir el patrón de impresión a utilizar. Se realizaron 4 pruebas y se eligió el “U invertida”, figura 5. Este patrón compensa el peso que se genera la superficie al curvarse hacia un lado, como se grafica en la figura 6, la parte coloreada representa donde se concentra la fuerza ejercida, que es donde el patrón tiene una mayor superficie de contacto con el piso y entre capa y capa.



Figura 5. Prueba técnica patrón “U invertida”. Fuente: Elaboración propia, 2020.

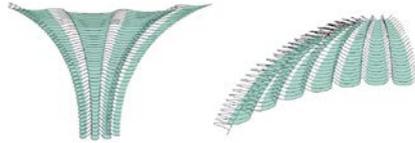


Figura 6. Peso ejercido en patrón “u invertida” aplicado en geometrías abierta y cerrada (anticlástica y sinclástica), respectivamente. Fuente: Elaboración propia, 2020.

En segundo lugar, se establecieron las variables a trabajar, tipo de geometría, el patrón y el espesor de muro, para ver cómo este afecta el peso y estabilidad de la impresión. Esto se diagramó en la siguiente tabla:

Tabla 2. Variables de impresión. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Superficie	Patrón	Espesor de muro
Sinclástica	U invertida	Variable
Anticlástica		Invariable

3.2 Algoritmo elaborado en Grasshopper

Se revisará el funcionamiento del algoritmo elaborado en Grasshopper que integra las variables mencionadas anteriormente.

El código traza una línea recta vertical, para darle altura al modelo, y luego se traza el arco, a continuación de la recta. El código permite variar la altura de la línea y el radio del arco. Luego se realiza la evaluación de los centros de masas a través de rectángulos que simulan el cordón de impresión. Se comenzó con un rectángulo de 7 x 4 milímetros, ya que al medir el tamaño del cordón de impresión impreso con un extrusor redondo de 9 milímetros de diámetro, con el que se realizó la experimentación, estas fueron sus medidas resultantes.

Se continúa con la revisión de un rectángulo de 8 x 3 mm. y 9 x 2 mm. Estos valores surgen al trabajar con la misma cantidad de materia, pero distribuida de formas diferentes, ya que las tres dimensiones tienen un perímetro de 22 mm que es lo que se logra extruir con la boquilla de 9 milímetros.

Los rectángulos se evalúan de la siguiente manera: los que sobrepasen la mitad o más del rectángulo antecesor se eliminan, y hasta donde se generan estas superposiciones de rectángulos se corta el arco. Luego se evalúa el arco restante con las siguientes dimensiones de rectángulos, repitiendo esta acción, hasta pasar por las tres dimensiones del rectángulo.

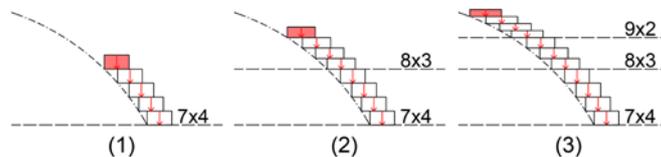


Figura 7. Esquema de evaluación de tamaño de cordón de impresión según centros de masa. (1) Cordón de 7x4 mm, (2) cordón de 8x3 mm, (3) cordón de 9x2 mm. El rectángulo superior rojo es el que no cumple las condiciones y cae por gravedad. Fuente: Elaboración propia, 2021.

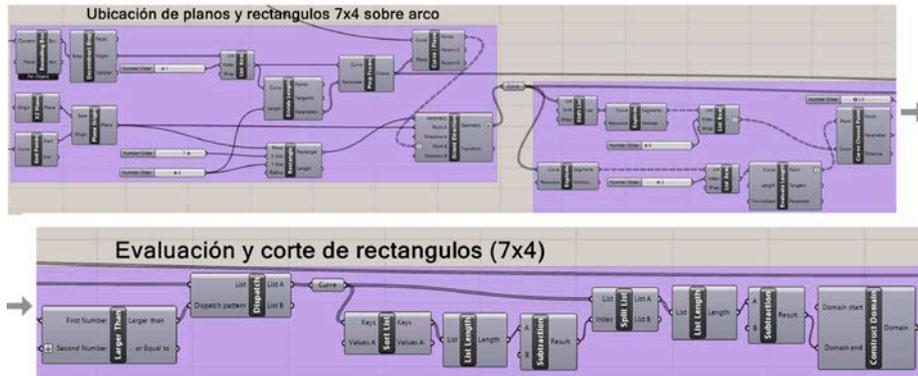


Figura 8. Segmento del algoritmo en Grasshopper, evaluación para rectángulos 7x4. Fuente: Elaboración propia, 2020.

En este caso el código evalúa solo rectángulos con estas dimensiones, 7x4, 8x3 y 9x2 centímetros, ajustándose para este caso específico. Las dimensiones de los rectángulos no alcanzan para cerrar el arco, ya que se llegó a un límite técnico, si se utilizaba un rectángulo de 10x1mm, no se imprimiría correctamente al ser muy delgado.

Con los rectángulos ubicados sobre el arco, se posicionan los planos en la arista inferior de los rectángulos. Estos planos conforman las capas de impresión, como se muestra en la sección (c) de la figura 9.

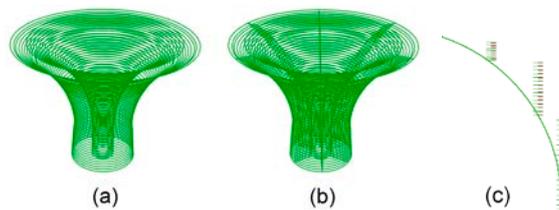


Figura 9. Visualización (a) Offset de muros, (b) división de planos, (c) ejecución del tercer segmento del algoritmo en Grasshopper. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Una vez evaluado que la distribución de cordones se acerca a cerrar el arco hasta el límite de impresión, este se gira un respecto a un eje de revolución. Dependiendo del lugar que se posicione el eje de revolución, es la superficie que se genera (sinclástica o anticlástica). Luego la figura revolucionada se le aplica un offset (a), el cual puede ser variable o invariable, es decir el espesor del muro puede variar o mantenerse constante. Luego se divide cada plano formado entre los offset y se aplica el patrón "U invertida" a la superficie.

Con esta última acción quedan listos los modelos digitales, como se previsualiza en la imagen 10.

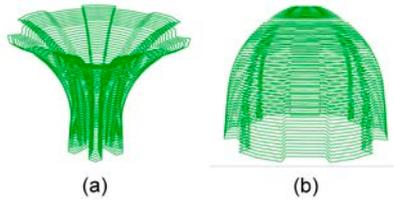


Figura 10. Modelos digitales (a) superficie anticlástica, (b) superficie sinclástica.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

4 Resultados

En esta última etapa se realizó la experimentación del algoritmo elaborado en Grasshopper, se imprimieron **cuatro prototipos en arcilla**, en una impresora 3d tipo cartesiana con una jeringa de para extruir la arcilla, facilitada por la oficina GT2P. Se revisaron los resultados a través de un análisis cuantitativo para finalmente realizar las respectivas conclusiones.

4.1 Prototipo 1

Este prototipo posee una superficie sinclástica, patrón U invertida y espesor de muro invariable, las medidas del modelo digital son 220 x 220 x 178 milímetros (Ancho, largo y alto), las medidas del prototipo son 170 x 165 x 170 milímetros y se calculó una contracción del 21,1%.

Al comenzar a imprimir este prototipo se advirtió que el patrón estaba muy poco espaciado entre sí, por este motivo la parte inferior se visualiza densa. Además, se imprimió de un día para otro y por ende se encogió en la base, al día siguiente al continuar imprimiendo se generó un desfase.



Figura 11. Prototipo 1: Modelo digital, vista frontal, vista aérea y vista en planta.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

4.2 Prototipo 2

El prototipo 2 posee una superficie anticlástica, patrón U invertida y espesor de muro variable, (30 a 20 mm), las medidas del modelo digital son de 220x236 x120 milímetros (ancho, largo y alto), las medidas del prototipo son de 204x 206x120 milímetros y se calculó una contracción del 10%.

Para este prototipo se consideró distanciar el patrón “U invertida” y acortar la base, para que tomará menos tiempo imprimirlo, esto se aplicó también para los siguientes prototipos. Luego de imprimir se observó una deformación en la

parte superior, se asentó en la parte superior, esto se podría atribuir a viscosidad de la arcilla.



Figura 12. Prototipo 2: Modelo digital, vista frontal, vista aérea y vista en planta.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

4.3 Prototipo 3

Este prototipo posee una superficie sinclástica, patrón U invertida y espesor de muro variable, (30 a 20 mm), las medidas del modelo digital son de 217x210x118 milímetros, (ancho, largo y alto), las medidas del prototipo son de 205x190 x120 milímetros y se calculó una contracción de 5.6%.



Figura 13. Prototipo 3: Modelo digital, vista frontal, vista aérea y vista en planta.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

4.4 Prototipo 4

Este prototipo posee una superficie anticlástica, patrón U invertida y espesor de muro invariable, las medidas del modelo digital son de 229x246x178 milímetros, (ancho, largo y alto), las medidas del prototipo son 240 x 195 x 195 milímetros y se calculó una contracción de 8.8%

Este prototipo no se deformó en la parte superior a diferencia del prototipo 2 siendo que se trabajó bajo las mismas condiciones para el material.



Figura 14. Prototipo 4: Modelo digital, vista frontal, vista aérea y vista en planta.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

5 Discusión

A partir de los resultados se puede concluir que al integrar las variables de apoyo de las capas sobre el centro de masa y la relación de ancho y alto de cordón de impresión es posible acercarse a la horizontal en una superficie de doble curvatura autoportante.

Respecto a las diferencias del prototipo 2 y el prototipo 4, se observó que la parte superior se deformó menos en el prototipo 4, esto se puede atribuir a que se mantuvo el espesor de muro regular, es la única variable que las diferencia uno del otro, ya que la materialidad y condiciones en que se imprimieron se trabajó de la manera más homogénea posible. En general se observó que los experimentos con espesor de muro diferenciado se deformaron más que los que se mantuvo regular este espesor, por ende, mayor cantidad de materia sirve para estructurar la geometría y el peso de esta no colapso o deformó la figura significativamente.

Se debe considerar en el diseño la contracción del material cuando este se seca, para que no se marque bruscamente el cambio de la dimensión del cordón de impresión, como sucedió en el prototipo 1. Se calculó el porcentaje de la contracción promedio, que fue de 11.37% en esta materialidad, esto da pie a encontrar un material para imprimir con una reología adecuada, que no encoja significativamente, ya que los prototipos están pensados a escala 1:20, por lo que estos cambios son 20 veces más grandes si son construidos con esta misma materialidad.

El patrón de diseño ayudó a mantener las capas apoyadas hacia el lado con más esfuerzos y en el momento de imprimir la parte del cordón que quedaba expuesta al exterior, al límite de caer se lograba mantener estable cuando el extrusor pasaba hacia la parte "interior" del patrón.



Figura 15. Estabilización del cordón de impresión. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Respecto al código en Grasshopper este se pudo haber elaborado para que evaluara iterativa y genéricamente respecto a un tamaño de rectángulo inicial, dependiendo del tamaño de extrusor que se utilice, de esta manera siendo adaptable para múltiples tamaños de extrusores.

Para investigaciones a futuro se propone poner a prueba aún más al límite de la horizontalidad de la impresión 3d, utilizando un extrusor más grande, y así, obtener un cordón de impresión más grueso, junto con esto, lograr cerrar la geometría sinclástica, que debido al límite técnico mencionado anteriormente no se logró cerrar. Indagar que materialidad trabajaría mejor aplicada a esta investigación, o que agregados o aditivos se le pueden añadir

para tener una correcta reología, una menor asistencia en el proceso y un eficiente modelado final. Y finalmente investigar la fusión de las superficies sinclásticas y anticlásticas impresas en 3d, para generar espacialidades más diversas.

6 Referencias

- 3D Potter. (2020). *Scara H.D. (Heavy Duty)*. <https://3dpotter.com/printers/scara-elite-xbpln>
- Crovetto Kent, B. (2019). Modelación de la sedimentación en la reología de suspensiones de partículas finas.
- Doyle, S. E., & Hunt, E. L. (2019). Dissolvable 3D Printed Formwork [Encofrado Impreso 3D soluble.]
- Heller, R., & Salvadori, M. (1987). Estructuras para Arquitectos.
- Hudson, R. (2010). *Strategies for parametric design in architecture: an application of practice led research [Estrategias para el diseño paramétrico en arquitectura: una aplicación de la investigación dirigida por la práctica]*, (Doctoral dissertation, University of Bath).
- ICON. (2020). *Meet the Vulcan*. <https://www.iconbuild.com/technology>
- ICON. (2020). *Project*. Recuperado el 12 de Agosto del 2020 de <https://www.iconbuild.com/projects>
- Lim, J. H., Weng, Y., & Pham, Q. C. (2020). 3D printing of curved concrete surfaces using Adaptable Membrane Formwork. *Construction and Building Materials [Impresión 3D de superficies curvas de hormigón mediante encofrado de membrana adaptable. Materiales de construcción y edificación]*, 232, 117075.
- Martínez-Rocamora, A., García-Alvarado, R., Casanova-Medina, E., González-Böhme, L. F., & Auat-Cheein, F. (2020). Parametric Programming of 3D Printed Curved Walls for Cost-Efficient Building [Programación paramétrica de paredes curvas impresas en 3D para un diseño de edificios rentable]. *Design. Journal of Construction Engineering and Management*, 146(5), 04020039.
- Nematollahi, B., Xia, M., & Sanjayan, J. (2017). Current progress of 3D concrete printing technologies [Avances actuales de las tecnologías de impresión de hormigón en 3D]. In *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction* (Vol. 34). IAARC Publications.
- Sánchez Velasco, V. E., & Castro Salgado, S. A. (2020). Digital Fabrication: an Outlook from Digital Tectonics [Fabricación digital: una perspectiva de la tectónica digital].
- WASP. (2020). *TECLA*. <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/>