

GYROID

ESTUDIO DE VARIABLES TRANSVERSALES EN EL PROCESO DE DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE LA SUPERFICIE MÍNIMA GYROID

<AUTOR_>

Matías Sánchez Leiva

<PROFESOR_GUÍA_>

Sebastián Rozas

<ABSTRACT>

El objetivo principal de esta investigación es descubrir las variables transversales para el diseño, cálculo estructural y fabricación digital de la superficie mínima gyroid. Para lograr este objetivo, primero se realizó una revisión bibliográfica de las distintas maneras en que se ha abordado la superficie gyroid, respecto a los tres ejes propuestos. En segundo lugar, se plantea un pabellón gyroid elaborado por medio de una secuencia de experiencias de programación y diseño digital que permiten generar métodos comparados en cada eje investigativo a fin de identificar las variables que los afectan transversalmente. Finalmente, con la información recopilada, se desarrolla un algoritmo que integra de manera eficiente la geometría, el cálculo y la fabricación de modo concatenado pudiendo visualizar cada variable del proceso en el resultado.

< INTRODUCCIÓN >

< ÁREA_DE_ESTUDIO_ >

Hoy en día, el área de la construcción enfrenta el desafío de disminuir los efectos contaminantes de su actividad. Los altos costos energéticos y la poca eficiencia en la utilización de materiales han provocado que, según la Agencia Internacional Global Alliance for Buildings and Construction (2018), “el sector Construcción acumula cerca de 40% del total de las emisiones de CO₂ a nivel global relacionadas a la generación de energía. De este total, cerca de 70% se explica por la emisión en el proceso constructivo”. Siendo imperativo desarrollar acciones que disminuyan la brecha contaminante y entreguen mayor eficiencia en los elementos estructurales y el uso del material, así como se expresa en el estudio de De Wolf et al. (2017) “no solo es importante una reducción en la cantidad de material utilizado en términos de volumen estructural, sino que también la cantidad necesaria durante la construcción”.

Para enfrentar el desafío planteado anteriormente es necesario distinguir que esta investigación aborda tres sub-áreas que se deben **integrar: cálculo estructural, geometría y fabricación.**

En primero lugar, se presenta una verificación de la forma en base a requerimientos de distintas solicitaciones y materiales a usar. De este modo, se trata el **cálculo estructural** desde la mirada en que los principales puntos a evaluar son la transmisión de esfuerzos hasta la base de los elementos y las zonas de continuidad y discontinuidad presentes en las geometrías. Al mismo tiempo se debe tener en consideración los materiales a utilizar, ya que cada uno de estos suscita características propias que influyen en el cálculo y como son aplicables para una optimización.

En segundo lugar, están tipos de geometría que respondan a la reducción más concreta del uso de material en conjunto con un traslado directo de fuerzas y la menor presencia de discontinuidad. Con lo cual, bajo la mirada del cálculo expuesta en el

párrafo anterior, se abordan las **geometrías de superficies mínimas** siendo definidas primeramente como las mínimas áreas describibles entre cualquier límite dado y presentando la característica de describir con su forma el flujo natural de las fuerzas, permitiendo optimizar al máximo el uso de materiales.

Ahora bien, teniendo un campo de acción general como lo son las superficies mínimas, es pertinente apuntar a un grupo más específico de componentes, como lo son las “Superficie mínimas triplemente periódicas” **Este tipo de geometrías presenta características específicas (periodicidad) que le permiten unirse, una a continuación de otra en las tres dimensiones, de manera que genere elementos de mayor envergadura sin saltos ni aristas y con gran potencial para el diseño arquitectónico.**

Iniciando con una unidad mínima o parche fundamental, que describe un crecimiento de la superficie, siguiendo estrictas normas de simetría espacial como reflexiones, rotaciones y traslaciones. Usualmente, dicha simetría está determinada por una retícula geométrica espacial, usualmente cúbica.

Por último, procesos que permitan lograr una comunicación que evite la pérdida de datos en la transición de las fases de diseño a la de construcción de manera que se prevengan los procedimientos ineficientes, además de dar una respuesta precisa a los requerimientos de manufactura de las geometrías mencionadas. En tal sentido es apropiado plantear la **fabricación digital**, la cual de manera simple significa, la digitalización de los procesos de fabricación” (Ortega, 2016), consistiendo en “convertir la información en cosas y las cosas en información” (Ortega, 2016) por medio de una serie de procesos que tienen como objetivo último el materializar más fiel al diseño de los elementos en cuestión.

Este tipo de fabricación incluye, además,

algunos sistemas y tecnología que posibilitan su ejecución, como sistemas integrados, sistemas CNC (control numérico computarizado), software CAD (diseño asistido por ordenador) e Internet. Todos estos elementos posibilitan atender de manera sumamente específica los requerimientos de casi cualquier geometría imaginable.

Es por todo lo mencionado previamente que **el área de estudio** de esta investigación **se define por la intersección de estos tres elementos.** Entendiendo estas sub-áreas como una serie de sucesos y estrategias que pueden ser sujetas de una optimización combinada, para abordar desde distintas perspectivas materiales los requerimientos de la geometría de estudio.

<PROBLEMA_DE_INVESTIGACIÓN_>

El problema de investigación se aborda desde los puntos planteados anteriormente en conjunto con observaciones realizadas en la revisión teórica de distintas investigaciones.

Como punto de entrada, se determinó como geometría de estudio, la superficie mínima triplemente periódica (TPMS) Gyroid, por la capacidad de ser estructuralmente eficiente en relación a la continuidad tridimensional que presenta, como da cuenta “Increased efficiency gyroid structures by tailored material distribution” de Downing et al. (2021), con palabras como “La eficiencia material del gyroid proporciona beneficios de rendimiento estructural para la modificación del peso ligero y la rigidez”, dejando en claro las ventajas de la geometría, además de indagar en posibilidades de mejoras en la eficiencia estructural de esta.

Otra investigación que presenta un estudio sobre el gyroid es “Multifunctional Mechanical Metamaterials Based on Triply Periodic Minimal Surface Lattices” de Al-Ketan y Abu Al-Rub (2019), en donde se discute una relación entre material, topología y propiedades mecánicas, en que se puede ver demostrada una prueba de diversas materialidades para evaluar variables estructurales por medio de ensayos físicos a muy baja escala.

Respecto a las investigaciones revisadas, es posible constatar **una ausencia de enfoques que planteen una búsqueda de optimización conjunta de geometría, estructura y fabricación con relación al gyroid**, por lo cual se abordara un estudio aparte de esto con la situación ideal de realizar un cruce de estas variables.

El estudio “KnitCrete: Stay-in-place knitted formworks for complex concrete structures” de Popescu (2019), plantea una posibilidad de optimización completa del proceso de fabricación en hormigón desde un cambio en la variable del encofrado, ideando una tela capaz de funcionar como esto, así logra dar

una respuesta eficiente a elementos curvos más óptimos estructuralmente, además de evitar factores de residuos provenientes del transporte ya que al ser una tela, es muy liviana y del moldaje dado que al terminar esta forma parte de la pieza final como acabado.

En este punto, recapitulando lo antes expuesto nos permite darnos cuenta de que las investigaciones examinadas están enfocadas principalmente en soluciones particulares para cada situación y no en tener variables transversales al problema de construir y calcular una forma, es así como **el problema se enfoca en indagar cuales serían las variables de optimización transversales para distintas estrategias de fabricación que mantengan la eficiencia estructural en una geometría específica.**

Dado lo anterior se genera la interrogante **¿Cuales serían las variables transversales en el proceso de diseño, cálculo y fabricación de la superficie mínima gyroid?**

A lo que se plantea como posible solución que, mediante la comparación de experiencias en un flujo de trabajo para la fabricación digital de superficies mínimas, **se identifican puntos similares como la resolución del modelo, el espesor requerido o la escala, que propician una integración eficiente de las tres sub-areas estudiadas al igual que presentarse como variables de optimización en todos los casos.**

<MARCO TEÓRICO>

Las geometrías de superficie mínima triplemente periódicas encuentran en la fabricación digital la metodología adecuada para poder llevarse a cabo con la precisión que requieren

Desde esta premisa es que se plantea exponer tres líneas de conocimiento, en primer lugar, geometría gyroid, entendiéndola como un tipo de geometría que pertenece a la familia de las superficies mínimas triplemente periódicas. En segundo lugar, el calculo estructural sobre la geometría con un entendimiento de los requerimientos de la forma y como responden los materiales a esta. Finalmente abordar una sección de fabricación digital como métodos para dar respuesta a un traspaso fidedigno desde el diseño hasta el elemento materializado.

Luego de lo expuesto anteriormente se hará una discriminación de las posibilidades de fabricación abordadas con el objetivo de proponer un caso de estudio.

Minimal Surfaces as Self-organizing Systems

2010

La presente investigación se refiere al problema de generar computacionalmente geometrías de superficies mínimas utilizando sistemas de lazos elásticos entre partículas autoorganizadas, y optimizarlas para una fabricación digital.

La búsqueda geométrica se realizó utilizando ProceSSION 1.0.6 y se basa en las propiedades periódicas de las Triply Periodic Minimal Surface, reduciéndose a la necesidad crear la región básica de la superficie, encerrada en una celda caleidoscópica (ej: tetraedro). Conceptualmente esto consiste en generar una membrana tensada compuesta por partículas y sus conexiones y delimitada por las caras de un tetraedro. El comportamiento esperado es el de una película de jabón virtual, reordenándose a medida que se agregan o sustraen partículas del sistema. Simultáneamente a esto el algoritmo plantea que los lazos entre partículas se controlen mediante una función de triangulación de Delaunay, con el objetivo de tener orden sobre ellos tendiéndolos a una dimensión preestablecida (componentes de fabricación)

Así, la solución para generar infinitos TPMS se basa en establecer el sistema de restricciones o fuerzas que deben aplicarse tanto a las partículas como a sus conexiones para satisfacer la característica de curvatura media y la configuración topológica de la superficie final, desde este punto, basta con una serie de transformaciones (reflexión, traslación y rotación) para concluir la geometría deseada.

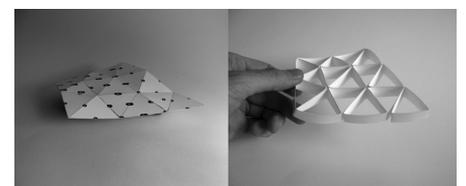
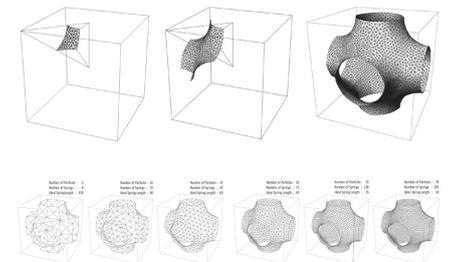
Respecto a la fabricación, plantea abordar el tema por medio de la búsqueda de **modulación de elementos**, de esta manera expone con el algoritmo, que **mediante el aumento o disminución de partículas, las longitudes de los lados (conexiones entre partículas) de los triángulos generados**

por el Delaunay logren quedar dentro de un parámetro establecido, buscando obtener que la longitud de estos sean equivalentes en todas las superficies.

Como prueba del método se llevaron a cabo aplicando el algoritmo a la P surface, analizando el grado de precisión en la generación de geometrías y la calidad de las teselaciones triangulares producidas. En términos de fabricación se probaron una serie de prototipos, inicialmente de baja escala hechos con impresión 3d y posteriormente a mayor escala con distintos sistemas constructivos como anillos entrelazados o con papel, con la constante de que todos los métodos estaban basados en generar la geometría básica y su posterior replicación.

La ventaja del método radica en la capacidad de combinar los dos procesos dentro de un sistema por un lado la búsqueda de la forma y simultáneamente la teselación modular de elementos constructivos.

Fuente: Tenu, V. (2010). Minimal Surfaces as Self-organizing Systems. CuminCAD. http://papers.cuminCAD.org/cgi-bin/works/U=&P=http/Show?acadia10_196



Form is Matter - Triply periodic minimal surfaces structures by digital design tools

2017

Esta investigación, realizada en el Politecnico di Milano por Michela Rossi y Giorgio Buratti, se centra en entender como la traslación del espacio virtual al artefacto construido podría plasmarse en un proceso computacional. De esta manera, plantea aplicar herramientas digitales al diseño de estructuras que maximicen la eficiencia de la materia a través de la geometría paramétrica controlada.

Expone una búsqueda de formas relacionadas con las propiedades geométricas de las Triply Periodic Minimal Surface, estableciendo en primer lugar que, estas superficies se pueden realizar definiendo su región fundamental, debido a su gran simetría, presentando después muchas copias convenientemente transformadas se puede llegar a la forma final.

Adicional a lo anterior, aborda que una superficie mínima presenta en si misma diferentes curvaturas, deduciéndose que no todos los puntos de la superficie soportan las cargas por igual, sin embargo, **“si una superficie mínima esta asociada con una distribución periódica de módulos, esto provoca un efecto compensatorio entre ellos aumentando así su eficiencia estructural”** (Rossi & Buratti, 2017), de esta manera se entiende que este tipo de geometrías funcione mas optimamente como una celosía de elementos y no de forma individual.

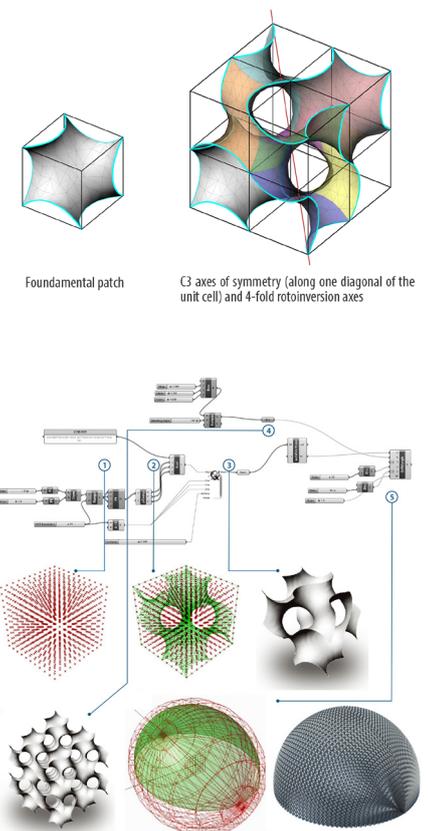
Basándose en lo planteado en los párrafos previos, es que por medio del software Rhino, utilizando el plugin grasshopper se propone describir un aproximación de distintas TPMS utilizando funciones lineales de tres variables del tipo $f(x,y,z)=0$, se utiliza este método por que permite manejar gran numero de elementos que definen las TPMS sin sobrecargar el proceso de

calculo de estas. El algoritmo en si consiste en que la ecuación “selecciona” los puntos que pertenecen a la geometría a describir, consecutivamente el mismo conecta dichos puntos por triangulación creando la superficie.

Consecutivo a definir la geometría, se ponen a prueba de forma comparativa una barra solida de 10x10x100 mm con dos estructuras equivalentes compuestas por las geometrías definidas (gyroid y P surface) cada una. Los modelos se ponen a prueba en COSMOS, un software de elementos finitos, que permitió simular las deformaciones de los elementos diseñados y su comportamiento mecánico en función de cambios en el espesor.

En relación al análisis de elementos finitos se llega a la conclusión que **las TPMS presentan cualidades de resistencia estructural levemente inferiores a una maciza, con la salvedad de tener un peso considerablemente inferior**, de hasta 8 veces menos, además de esto dicho elemento por ejemplo, compuesto por gyroids, aumenta considerablemente sus capacidades mecánicas al momento de aumentar su espesor.

Fuente: Rossi, M., & Buratti, G. (2017). Form is Matter - Triply periodic minimal surfaces structures by digital design tools. CuminCAD. http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ecaade2017_306



Increased efficiency gyroid structures by tailored material distribution

2021

El presente estudio aborda la geometría gyroid como un elemento de interés para la ingeniería y arquitectura, destacándose por ofrecer cualidades de eficiencia material al ser una triply periodic minimal surface.

Para definir esta geometría se hace uso del software Matlab, en donde es generada una aproximación matemática de ésta con la fórmula:

$$\sin\left(\frac{2\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{2\pi}{a}y\right) + \sin\left(\frac{2\pi}{a}y\right)\cos\left(\frac{2\pi}{a}z\right) + \sin\left(\frac{2\pi}{a}z\right)\cos\left(\frac{2\pi}{a}x\right) = h$$

con $h=0$ y a = la longitud de la celda unitaria.

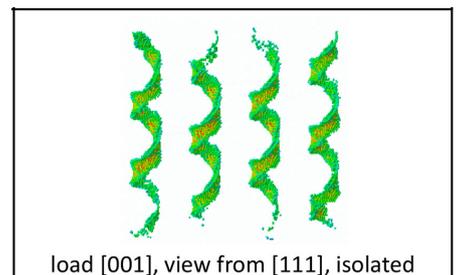
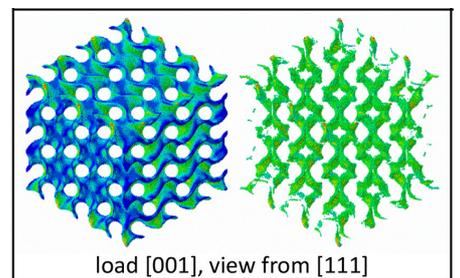
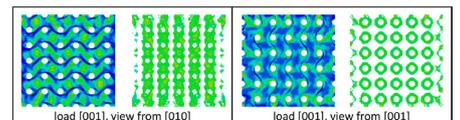
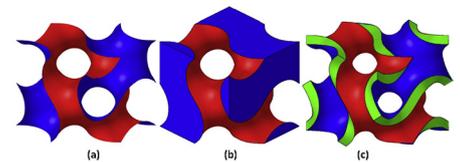
Añadido a esto, el gyroid estudiado en dos principales formas estructurales. En primer lugar la configuración de celosía (llenando un lado o región con material dejando el otro vacío (b)) y en segundo, de superficie sólida (la superficie engrosada, manteniendo las regiones vacías (c)), siendo esta última la que se aborda para el desarrollo de la investigación.

A través de métodos numéricos desarrollados en el software Abaqus Simulia, se determina que, **bajo una carga uniaxial, el gyroid de superficie sólida presenta zonas con tensión de von Mises** (magnitud física, que en ingeniería estructural se usa en el contexto de las teorías de fallo como indicador de un buen diseño para materiales) **mayor que la presente en el resto del material.** La mayoría de estas zonas, se encuentran dentro de regiones aisladas de la geometría con forma de helicoides entre las caras comprimidas. **Estas subestructuras representan la ruta de carga más directa a través del gyroid.**

Adicional a lo anterior, se plantea que conociendo **estas regiones portadoras**

de carga es posible ajustar localmente el grosor y la densidad de éstas, posibilitando un aumento en la resistencia mecánica y rigidez en las diferentes direcciones de aplicación de carga a través de la geometría. Esto permite un uso más eficiente de la distribución de materiales generando un rendimiento superior al momento de fabricar la geometría.

Fuente: Downing, D., Jones, A., Braundt, M., & Leary, M. (2021, 1 enero). Increased efficiency gyroid structures by tailored material distribution. ScienceDirect, 197(109096). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127520306316>



<FABRICACIÓN DIGITAL - ESCALA ARQUITECTÓNICA>

KnitCrete Stay-in-place knitted formworks for complex concrete structures

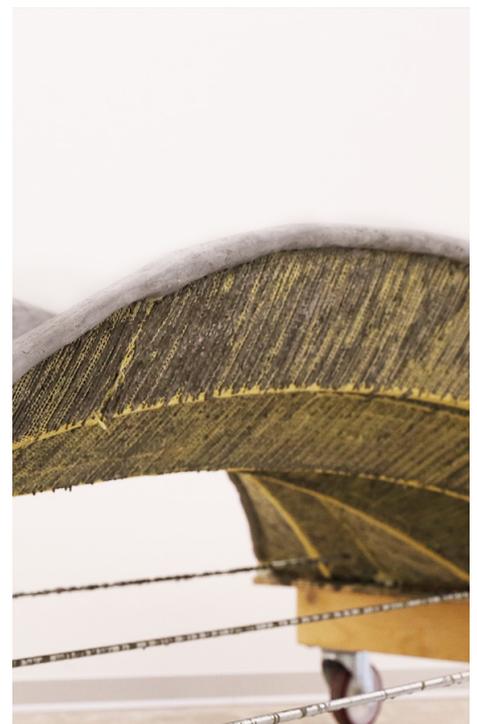
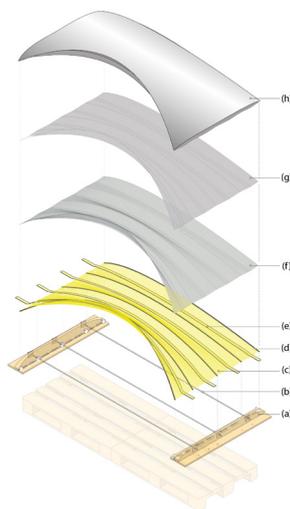
2019

Esta investigación, realizada en el ETH Zurich, se centra en el desarrollo de un sistema de encofrado para hormigón, que permite abordar geometrías de gran complejidad de una manera simple.

El sistema consta de un textil prefabricado según la curvatura que se desee describir (pretensado), incluyendo soluciones de refuerzo necesarias para la estructura.

Finalmente esta investigación se destaca por la gran versatilidad de la técnica y **ventajas en términos de transporte del material y reducción de desperdicios. Esto gracias a que una vez seca la pasta de cemento, el encofrado se vuelve parte de la pieza final.**

Fuente: Popescu, M. (2019). KnitCrete: Stay-in-place knitted formworks for complex concrete structures [Tesis de doctorado, ETH de Zúrich]. <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/408640>



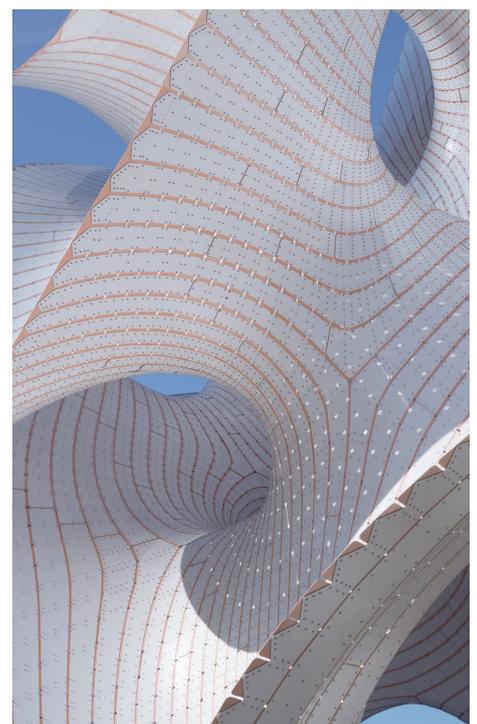
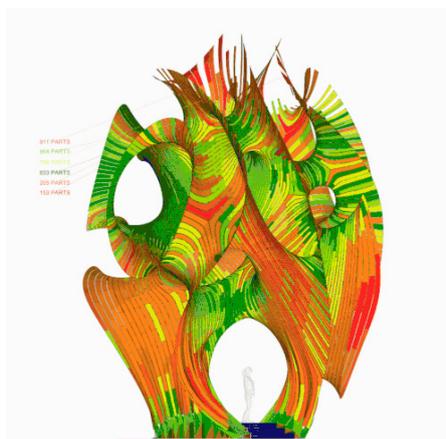
A stripes-based material system

Proceso de fabricación desarrollado por Marc Fornes / THEVERYMANY, que permite describir geometrías de doble curvatura por medio franjas estructurales.

En si, es un sistema, donde miles bandas (según la complejidad del proyecto) se distribuyen en toda la extensión la geometría tomando la forma única del lugar en que se emplaza.

Es gracias a esto que no existe la necesidad de moldaje o tensión al elemento a construir, ya que **a medida que se mondan las piezas, estas se ajustan con sus colindantes permitiendo lograr la curvatura de la forma final.**

Fuente: Fornes, M. (s. f.). A STRIPES-BASED MATERIAL SYSTEM. MARC FORNES / THEVERYMANY. Recuperado 1 de junio de 2021, de <https://theverymany.com/invention-of-stripes>

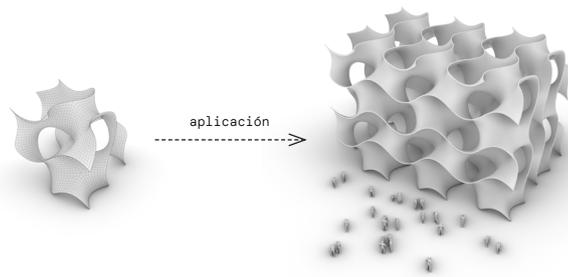


<METODOLOGÍA>

<CASO_O_ÁMBITO_DE_ESTUDIO_>

Para responder la pregunta de investigación, **se plantea elaborar un pabellón gyroid, por medio de una serie de experiencias en las áreas de geometría, calculo estructural y fabricación digital que permitan abordar el gyroid desde más de un punto de vista.**

Una vez realizada etapa por etapa, se aborda una fase final donde se busca integrar en un flujo todas las variables que fueron pertinentes para cada caso en particular.



<INVESTIGACIÓN>

<ESCALA ARQUITECTÓNICA>



```
rhino
grasshopper
//plugins
karamba 3D
galapagos
opennest
millipede
chromodoris
```

COMPUTADOR_



SERIE DE EXPERIENCIAS

//plugins de grasshopper

Karamba 3D, es un programa interactivo y paramétrico de elementos finitos. Permite analizar la respuesta de estructuras bajo cargas arbitrarias. Para el estudio es relevante ya que permite abordar la variable del cálculo.

OpenNest, se utiliza para empaquetar polígonos cerrados 2D, a menudo se utiliza para la fabricación, es decir, corte por láser o CNC.

Millipede, es un componente de optimización y análisis estructural para grasshopper. Gracias a uno de sus componentes es posible definir el gyroid.

Chromodoris, el objetivo de esta biblioteca es proporcionar una funcionalidad simple y eficiente para ampliar la creación, uso y visualización de mallas. Permite definir la geometría del gyroid

<DEFINICIÓN_DE_INSTRUMENTOS>

Para la serie de experiencias, se utilizarán los siguientes softwares y plugins.

//softwere

Rhinceros, es un software CAD (diseño asistido por computadora) de modelado 3d, que para el presente estudio sera utilizado como principal interfaz de diseño y visualización de simulaciones.

Grasshopper, es un plugin de rhinceros que actualmente viene integrado en éste. Consiste en un editor de algoritmos gráficos, que permitirá programar las series experimentales de la investigación, dando la posibilidad de editar y generar iteraciones con bastante facilidad por las características parametricas que brinda el software.

<EXPERIENCIA 01 - GEOMETRÍA>

En cuanto a, la secuencia investigativa planteada, se trata la primera etapa de esta, desde una visión abstracta y no material para la geometría de estudio. De manera que, desde la revisión conceptual y de algoritmos efectuada en el marco teórico, se plantean explorar tres métodos de definición geométrica del gyroid,

- 1_ algoritmo de programación visual, en grasshopper con plugin millipede.
- 2_ algoritmo de programación visual, en grasshopper con plugin chromodoris.
- 3_ algoritmo de modelado, en rhino, siguiendo el orden geométrico de los arcos + integración a grasshopper.

esto, en busca de una geometría que propicie una adaptabilidad por medio de parámetros, para asegurar su integración con procesos siguientes.

<ALGORITMO CON MILLIPEDE>

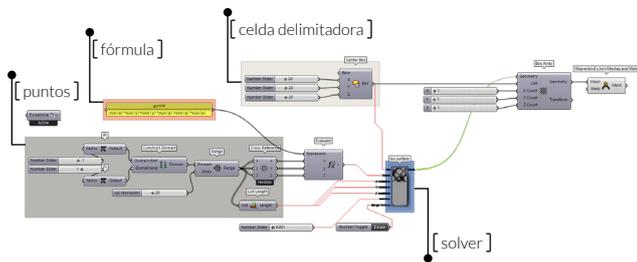


fig. 1. algoritmo de modelado de la geometría gyroid en grasshopper con plugin millipede.

El primer método para describir se ejecutó por completo con programación visual en grasshopper, por medio del plugin millipede como base para el algoritmo.

Este consta de cuatro etapas que conforman su funcionamiento.

En primer lugar, una definición de nube de puntos, posicionando 20 de estos en un dominio que va desde π a $-\pi$ en cada uno de los ejes, formado un cubo, como se grafica en la fig. 2, sección [01].

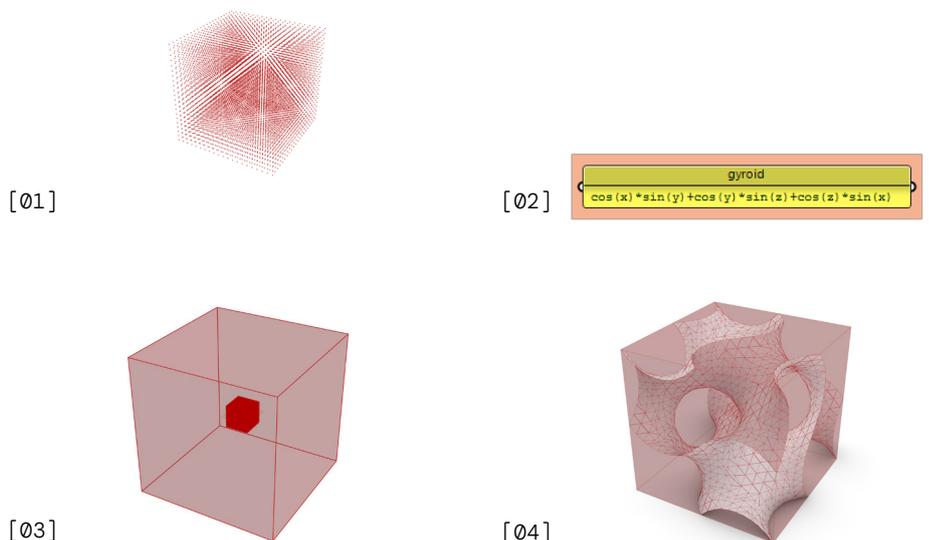
Una segunda variable en el algoritmo representa la ecuación del gyroid, fig. 2, sección [02]. Con la cual se evalúan los puntos para posteriormente conformar el gyroid.

A continuación, se encuentra la celda que delimita el tamaño de la geometría, establecida de 20 x 20 x 20 cm como se ve en la fig. 2 sección [03].

Finalmente, la última etapa del algoritmo es la del solver o solucionador que proporciona el plugin millipede, llamado "iso surface" en donde se ingresan los resultados de las fases previas, donde por medio de triangulación, da como producto el gyroid completo, así como se muestra en la fig. 2, sección [04].

fig. 2. [01] definición de nube de puntos. [02] ecuación del gyroid. [03] celda que delimita la geometría con la nube de puntos. [04] solver y resultado del algoritmo.

Fuente: elaboración propia, 2021.



<ALGORITMO CON CHROMODORIS>

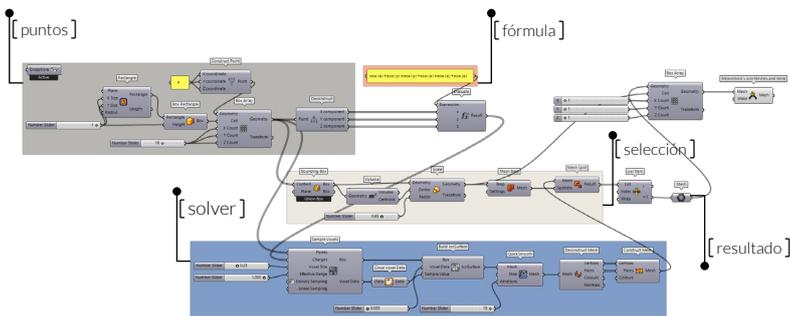


fig. 3. algoritmo de modelado de la geometría gyroid en grasshopper con plugin chromodoris.

Con respecto al segundo método, este se presenta en iguales condiciones que el expuesto previamente, realizándose por completo en grasshopper, no obstante, en él se hizo uso del plugin chromodoris para su ejecución.

En relación con la estructura del algoritmo, presenta tanto similitudes como diferencias con el anterior. Como en las etapas [01] y [02]. Que, a pesar de modificaciones en la forma del código, presenta pocos cambios en el resultado.

Por otra parte, las etapas siguientes, se exponen de manera bastante distinta en términos del código y resultados.

Así, la etapa [03], que conforma la parte central del funcionamiento del algoritmo, es en donde se ingresan los productos de las etapas anteriores en los componentes del plugin chromodoris (sample voxels, close voxel data y build isosurface), formando una geometría bastante abstracta, como se muestra en la fig. 4, sección [03], la cual es generada por triangulación de los puntos ingresados según los valores de la ecuación del gyroid.

Para finalizar, se localiza una celda, con proporciones específicas, que tiene el fin de seccionar la geometría abstracta, extrayendo la calda unitaria del gyroid, como se ilustra en la fig. 4, sección [04] y [05].

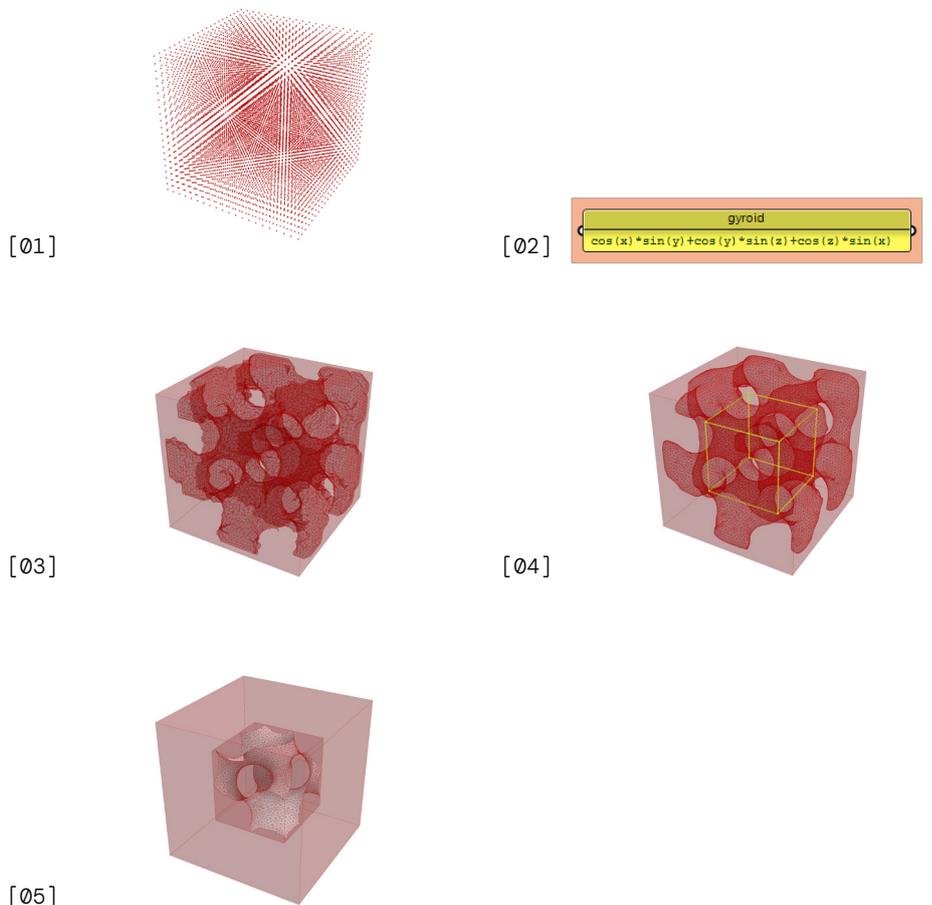
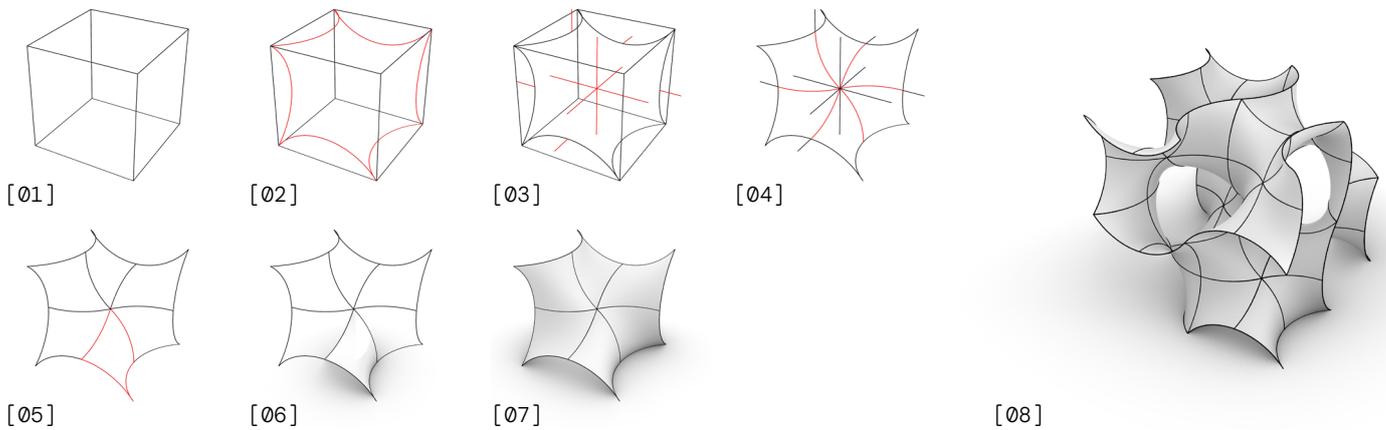


fig. 4. [01] definición de nube de puntos. [02] ecuación del gyroid. [03] definición de la geometría por triangulación de grupos de puntos. [04] suavizado y selección de una región de la superficie. [05] sección la geometría que define al gyroid.

Fuente: elaboración propia, 2021.

<ALGORITMO DE MODELADO SIGUIENDO ORDEN GEOMÉTRICO>



En relación con el ultimo método de definición geométrica, es abordado por medio de un algoritmo de modelado en rhino, siguiendo el orden geométrico de arcos.

El algoritmo, abarca seis etapas comenzando con un cubo de 100 x 100 x 100 mm, como elemento inicial, el cual define las dimensiones de la geometría. Luego se divide cada arista del este en tres partes iguales (100 mm / 3), de modo que al trazar los arcos como se grafica en la fig. 5 sección [02] se pueda tener un punto de referencia para la altura de estos.

A continuación, se fija el centro del cubo en conjunto con líneas de 20 mm perpendiculares a cada arco, iniciando en el punto medio de estos, fig. 5, sección [03].

Posteriormente, con el comando arcBlend, se trazan las curvas interiores de la geometría, seleccionando las líneas perpendiculares a los arcos que se encuentran contrapuestas. Para proseguir, se separan todas las curvas con el comando split, así como se seleccionan de a cuatro como se grafica en la fig. 5 sección [05] para emplear el comando edge curves a fin de definir la superficie que describe una región fundamental del gyroid, acción que se replica hasta formar un fragmento de este, el cual seguidamente por medio de operaciones de simetría forma la geometría completa, fig. 5, sección [08].

Por último, es conveniente acotar un pequeño código, fig. 6 sección [01], el cual permite integrar el gyrod modelado en rhino a grasshopper y convertir la geometría de superficies (brep) a mesh, pudiendo controlar su subdivisión, además de aligerar la carga poligonal al software.

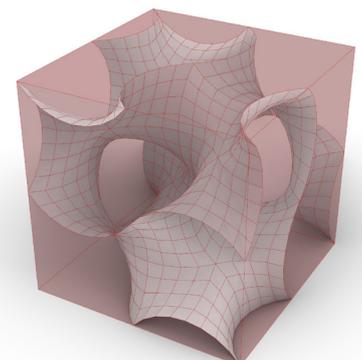
fig. 5. [01] cubo de 100 x 100 x 100 mm. [02] arcos de altura 100 mm / 3. [03] centro del cubo y de líneas perpendiculares al punto medio de los arcos. [04] curvas interiores. [05] selección de 4 curvas. [06] región fundamental del gyroid. [07] fragmento del gyroid. [08] celda unitaria del gyroid.

fig. 6. [01] algoritmo para integrar la geometría a grasshopper. [02] gyroid en grasshopper.

Fuente: elaboración propia, 2021.



[01]



[02]

<COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE DEFINICIÓN GEOMÉTRICA DEL GYROID>

Recapitulando, una vez descritos los tres métodos para definir geoméricamente el gyroid, es propicio identificar cual es más adecuado para el objetivo de adaptarse en los procesos siguientes. Para esto, se analizaron tres criterios, en primer lugar, la capacidad de funciona como conjunto (unión de dos o más celdas), en segundo, el orden poligonal que lo describe y en tercero, la versatilidad de uso que tienen las etapas que conforman los distintos algoritmos.

En cuanto a la primera variable, cabe destacar que es considerada por ser una característica propia del gyroid y al no presentarse, provoca que el método no sea útil para próximas etapas. Así como se puede contemplar en la fig. 7 sección [02] donde hay una discontinuidad en el centro, a diferencia de la sección [01] y [03], que no presentan esto.

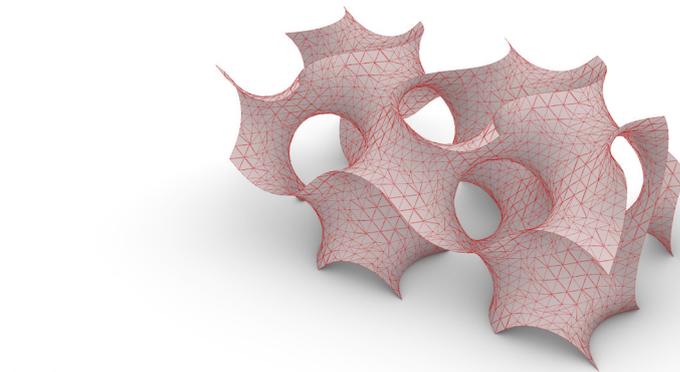
Con respecto a, la segunda variable, los resultados del primer y segundo algoritmos, presentan un orden de triángulos sumamente aleatorios, dificultando su manipulación. No así el último caso, que se diferencia por presentar un orden de cuadriláteros o triángulos de ser necesario, además de una homogeneidad en su organización.

Finalmente, el último punto, se establece en relación con las etapas que conforman cada algoritmo, siendo pertinente identificar que el objetivo del estudio es reconocer variables que propicien optimizar el proceso, siendo un sistema de ida y vuelta en el uso geométrico. Esta situación que se ve perjudicada en los algoritmos de millipede y chromodoris, que entregan el gyroid ya listo, casi instantáneamente, no así el método de modelado, el que es posible abordar desde diferentes escalas geométricas.

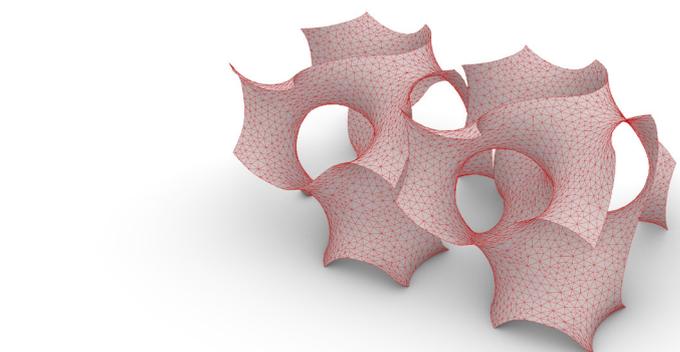
En resumen, según lo expuesto, el método más adecuado para asegurar su integración en los procesos siguientes es el algoritmo modelado siguiendo el orden geométrico.

fig. 7. [01] resultado del algoritmo con millipede [02] resultado del algoritmo con chromodoris [03] resultado del algoritmo de modelado.

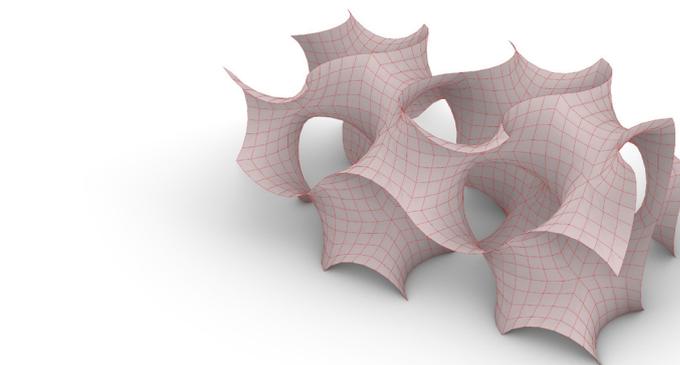
Fuente: elaboración propia, 2021.



[01]



[02]



[03]

<EXPERIENCIA 02 - ESCALA ARQUITECTÓNICA Y SIMULACIÓN ESTRUCTURAL>

Conforme a la segunda etapa del estudio, se plantea la **primera definición particular arquitectónica (la escala)**, tomando en cuenta el caso de estudio (pabellón gyroid), el cual es una estructura que define una espacialidad, la cual será usada por personas, por tanto, dicho elemento, requiere que exista la posibilidad de que un individuo transite por debajo de este.

Por otra parte, una vez definido esto, se ahonda en una **prueba/simulación estructural del gyroid, en busca de definir qué información entrega la geometría al ser sometida al software**. El cual, en este caso, corresponde al plugin de grasshopper llamado karamba 3D.

<DEFINICIÓN DE ESCALA PARA LA GEOMETRÍA DE ESTUDIO>



fig. 8. escala humana/altura promedio de mujeres y hombres en Chile.

Para esta etapa, fue necesario en primer lugar definir una escala humana, en este caso, la altura de un individuo en Chile. Para lo cual se revisó el estudio de NCD Risk Factor Collaboration (NCD-RisC) (2019), en donde se expresa que la altura promedio en Chile en el año 2019 para personas de 19 años, es de 159,4 cm y 172,9 cm para mujeres y hombres respectivamente.

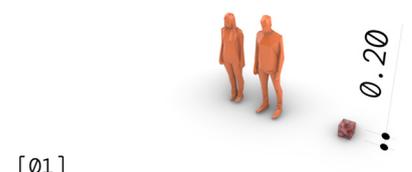
Ahora bien, como en la experiencia 01 la geometría carecía de consideraciones de escala, fue generada con una medida que facilitara su modelado, en este caso 20 cm. Es por lo mencionado, que, al ser comparada con la escala humana definida, como se aprecia en la fig. 9 sección [01], esta carece de características espaciales para albergar una persona.

Teniendo esto en consideración, es que para controlar las dimensiones de la geometría se le aplica el comando scale en rhino, dejando una altura total de 6 metros, entendiendo que la mitad de esto es la altura necesaria para lograr una espacialidad adecuada para un individuo.

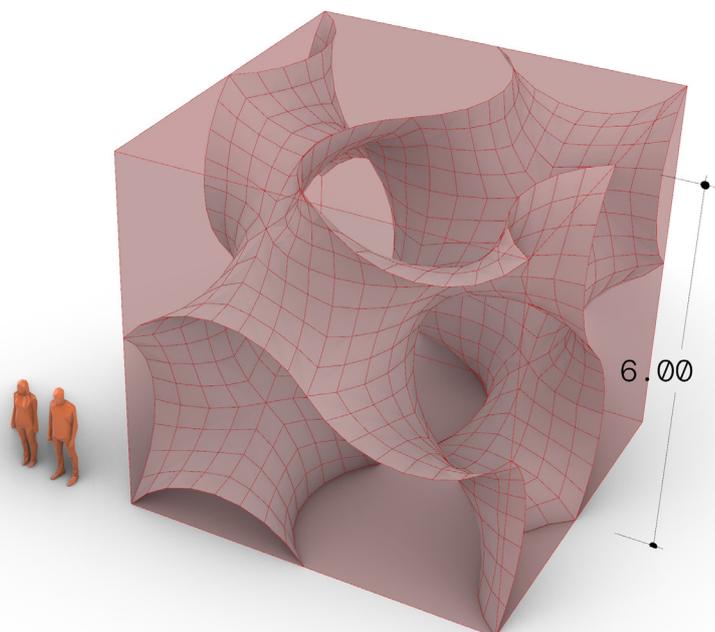
Adicional a lo mencionado, el hecho de escalar la geometría en este punto del proceso resulta necesario ya que el software karamba 3D funciona en unidades de metros, esto conlleva a que ingresar variables en otra unidad, tanto el resultado como el funcionamiento del programa sean erróneos, incluso produciendo que la aplicación colapse al analizar geometrías demasiado pequeñas.

fig. 9 [01] geometría de salida (altura 20cm) en la experiencia 01 comparada con escala humana.
[02] gyroid escalado a 6m de altura comparado con escala humana.

Fuente: elaboración propia, 2021.



[01]



[02]

<SIMULACIÓN ESTRUCTURAL CON KARAMBA 3D>

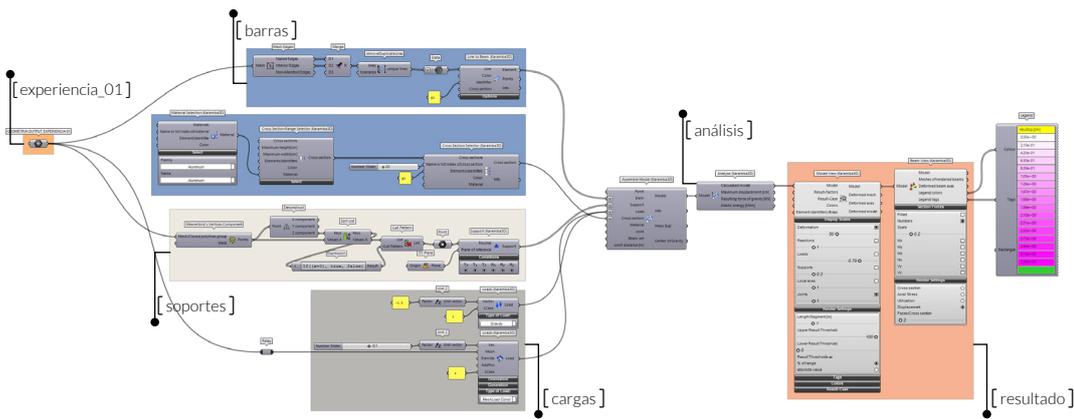


fig. 10 algoritmo de simulación estructural de la geometría gyroid en grasshopper con plugin Karamba 3D.

Luego de escalar la geometría resultante de la experiencia 01, esta se somete a pruebas bajo variables de carga uniaxiales, con el objetivo de analizar su respuesta estructural en dichas condiciones.

Adicional a esto, se define que las simulaciones serán efectuadas en un sistema de barras, tomando en cuenta el proceso constructivo que se desea explorar.

Para propiciar lo mencionado, se propone un algoritmo que consta de cuatro partes para funcionar.

En primer lugar, la definición de barras, extrayendo los bordes interiores y exteriores del gyroid como malla, además de asignar una materialidad (aluminio) y forma básica a estas.

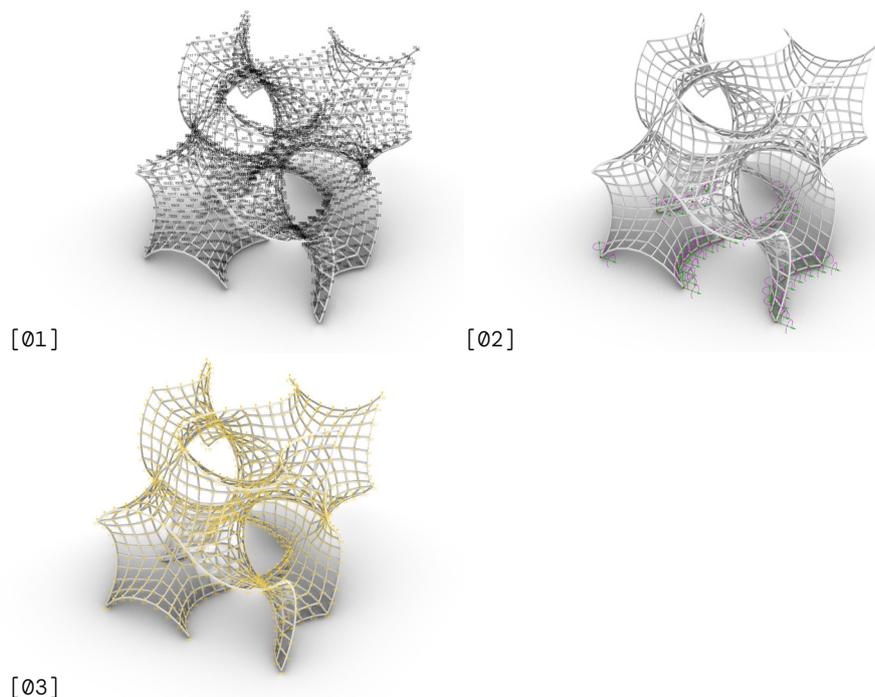
En segundo lugar, determinar los soportes de la geometría, fijando sus características de posición y capacidad de movimiento. En este caso, siendo definidos como estáticos y posicionándose en cada punto que se toca el suelo.

En la tercera etapa, se estipulan el tipo, dimensión y posición de las cargas que afectan la geometría. Para esta prueba, se definió un esfuerzo de gravedad, además de un sobrecargo de un kilo en cada barra del elemento.

Finalmente, estos tres puntos se ensamblan en un componente para luego ser analizados como conjunto de variables y arrojar una serie de resultados, siendo el de mayor interés en donde se muestra la deformación que sufre la geometría.

fig. 11 [01] sistema de barras para simulación estructural, [02] soportes del sistema de barras en el suelo, [03] cargas sobre el sistema de barras.

Fuente: elaboración propia, 2021.



<ANÁLISIS DE RESPUESTA ESTRUCTURAL DEL GYROID>



[01]

Una vez ejecutado el algoritmo, se analizaron los distintos resultados que ofrece, precisando a la deformación como el que brinda mayor cantidad de información respecto al comportamiento de la geometría en respuesta al esfuerzo de cargas.

Por lo mencionado, se puede comenzar observando el diagrama que arroja el cálculo, fig. 12, donde a mayor cantidad de color, más deformación presenta la geometría, siendo notorias las áreas en que esta presenta voladizos.

Así mismo, cuando el gyroid funciona como conjunto de elementos, fig. 12 sección [02], ambas geometrías conectadas solventan la deformación de uno de sus lados con la unión entre ambas, evidenciándose que independiente la cantidad de celdas que se vinculen, el conjunto geométrico siempre tendrá solo dos áreas de mayor deformación, siendo puntos de interés al momento de fabricarlo.

Por otra parte, de forma independiente a las características evaluadas, el análisis de la geometría como conjunto encuentra un límite técnico por la herramienta de hardware utilizada para el estudio, ya que la cantidad de módulos y subdivisión de estos representa un factor para el funcionamiento correcto del software utilizado, limitándose a cuatro módulos con subdivisión de cuatro igualmente.

[02]

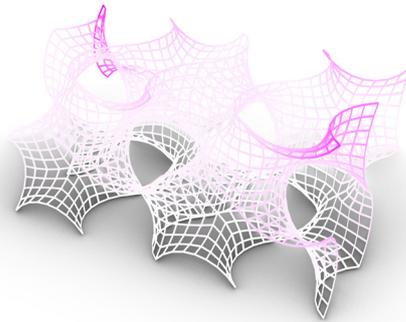
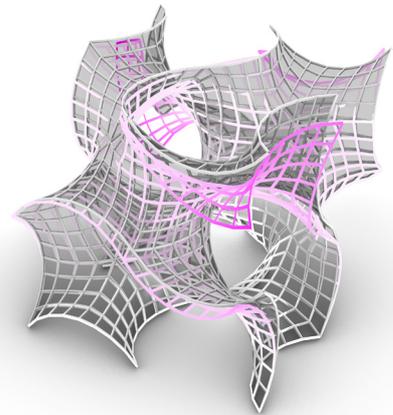


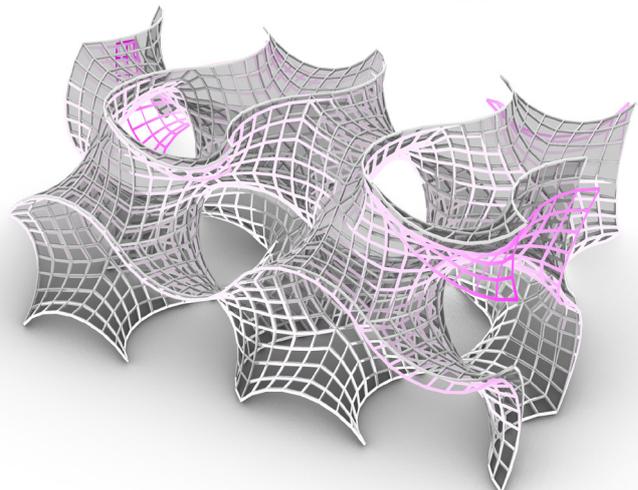
fig. 12 resultado del algoritmo, [01] áreas con mayor deformación en el gyroid como unidad, [02] áreas con mayor deformación en el gyroid como conjunto.

fig. 13 [01] simulación de desplazamiento de áreas por deformación como unidad, [02] simulación de desplazamiento de áreas por deformación como conjunto.

Fuente: elaboración propia, 2021.



[01]



[02]

<EXPERIENCIA 03 - VARIABLE DE FABRICACIÓN DIGITAL>

Primero que nada, es preciso mencionar que, para esta etapa, se trabajara con la región fundamental del gyroid como base geométrica. Proponiendo que, al poder resolverla algorítmicamente, es posible replicar dicha solución de igual manera al resto de la geometría.

Desde esta premisa, se busca precisar un algoritmo que funcione de manera iterativa por medio de parámetros, para tres niveles de fabricación concatenados,

- 1_ definición geométrica, de lo que se desea fabricar.
- 2_ definición de características secundarias para la fabricación, como elementos de montaje o espesor del material.
- 3_ aplicación de un nest y numerado a las piezas para ser llevadas a corte en CNC.

<ALGORITMO DE DEFINICIÓN GEOMÉTRICA DE FABRICACIÓN> "a"

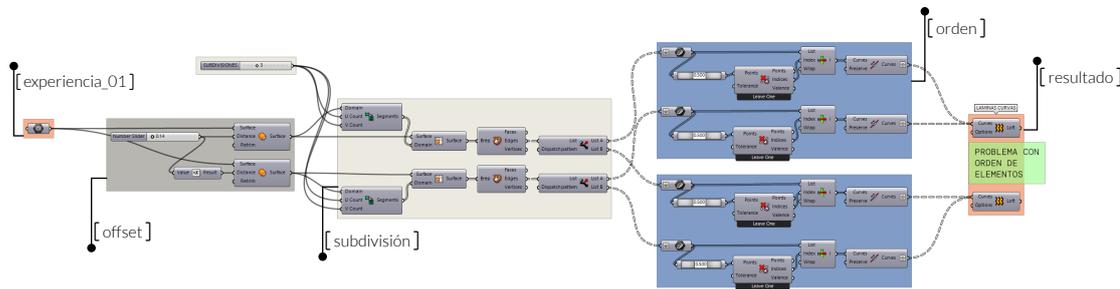


fig. 14 algoritmo "a" para definir de forma paramétrica la geometría del gyroid para fabricar.

El planteamiento de este algoritmo se basa en primer lugar, que la geometría que se desea modelar es una estructura de waffle, que presenta elementos en dirección U y V para funcionar.

el funcionamiento de este, como se en la fig. 14, sección [03], no obstante, al variar estos valores, provoca que la etapa de orden de elementos falle y genere lo que se grafica la fig. 14 sección [02a] y [02b].

fig. 15 [01] offset y subdivisión en "u" y "v" de la geometría. [02a] orden de elementos "error" offset: 0,14; subdivisión: 4. [02b] orden de elementos "error" offset: 0,10; subdivisión: 3. [02c] orden de elementos "acierto" offset: 0,14; subdivisión: 3. [03] resultado algoritmo en parámetros funcionales.

Teniendo lo anterior en cuenta, es que se desarrolla un código que consiste en cuatro etapas.

Para empezar, se realiza un offset hacia ambas caras de la geometría que ingresa, fig. 14, sección [01], a fin de evitar que se deformen en un solo lado las piezas al momento de definir su tamaño.

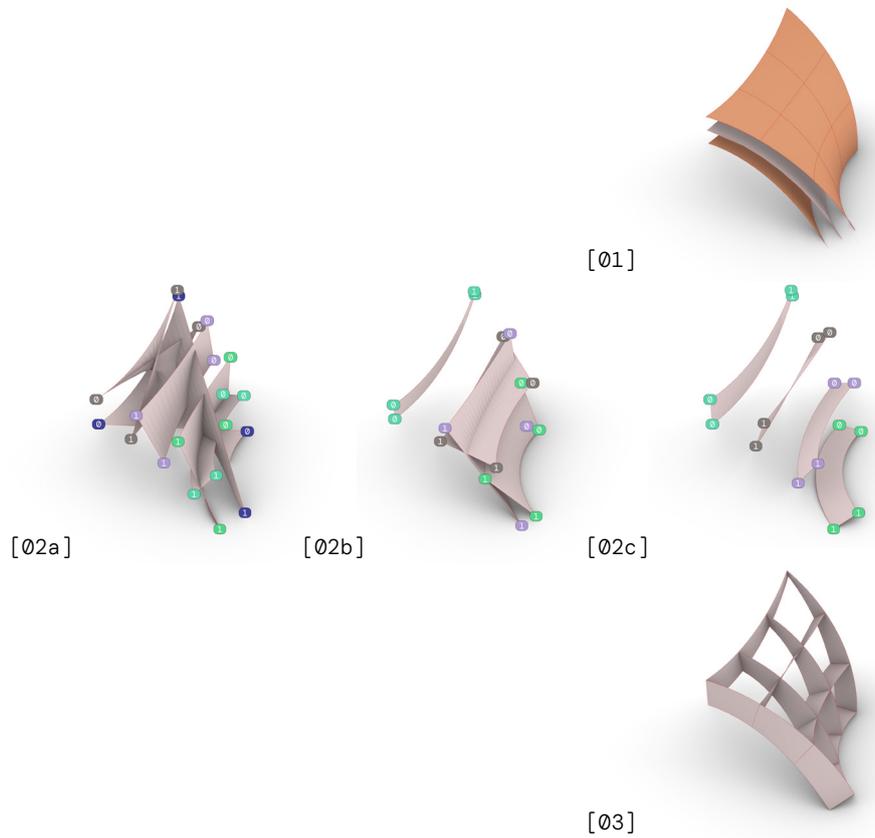
En segundo lugar, se subdivide la geometría resultante del offset y se deconstruye para extraer solamente las curvas que esto genera.

A continuación, se diferencian las curvas en dirección U de las V y se ordenan de manera independiente con el objetivo que empaten con las de enfrente.

Finalmente, por medio loft, las curvas de un lado de la geometría inicial se unen con las del otro como se aprecia en la fig. 14, sección [02a].

Con respecto a este algoritmo, cabe destacar que fue elaborado con valores de offset y subdivisión de 0,14 y 3 respectivamente, los cuales como parámetros específico aseguran

Fuente: elaboración propia, 2021.



<ALGORITMO DE DEFINICIÓN GEOMÉTRICA DE FABRICACIÓN> "b"

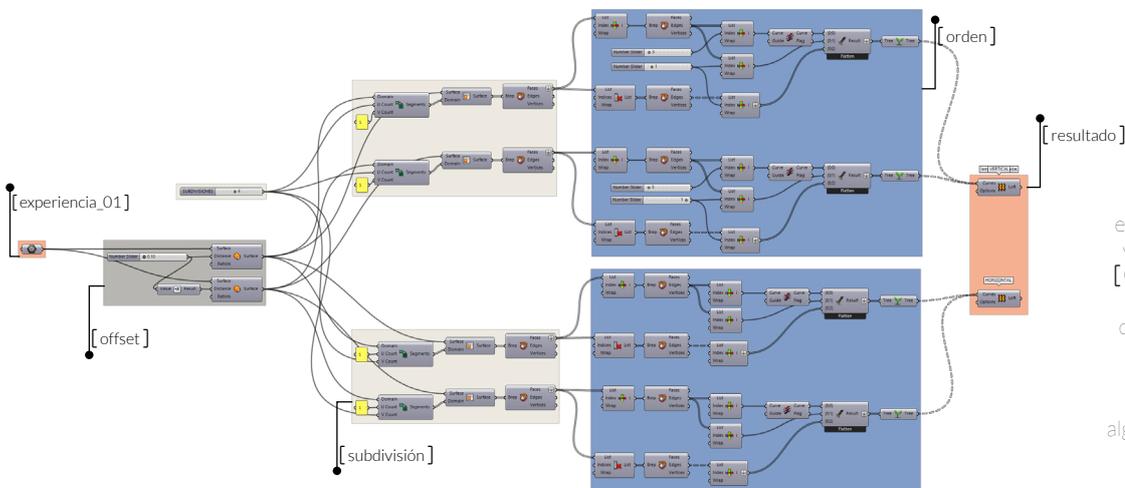


fig. 16 algoritmo "b" para definir de forma paramétrica la geometría del gyroid para fabricar.

fig. 17 [01a] offset y subdivisión en "u" de la geometría. [01b] offset y subdivisión en "v" de la geometría. [02a] orden de elementos "acierto" offset: 0,14; subdivisión: 4. [02b] orden de elementos "acierto" offset: 0,10; subdivisión: 3. [02c] orden de elementos "acierto" offset: 0,14; subdivisión: 3. [03a] resultado algoritmo en parámetros funcionales. [03b] resultado algoritmo en parámetros funcionales

En cuanto al segundo algoritmo planteado, este presenta un objetivo geométrico igual al anterior, además de funcionar con la misma cantidad y tipo de etapas. Sin embargo, la organización que muestra genera que opere de manera bastante distinta.

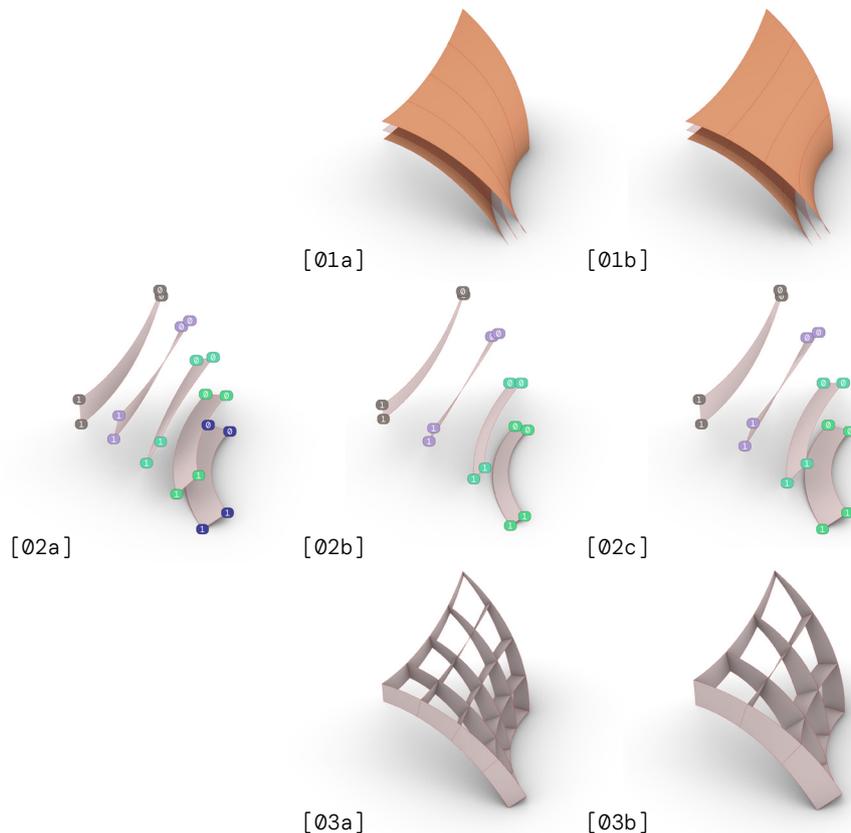
Por lo que se refiere a la primera etapa, esta se establece exactamente igual que en el otro caso.

En cambio, la segunda parte, se plantea definiendo de manera individual las subdivisiones en U y V en cada superficie como se ve en la fig. 16, sección [01a] y [01b], con el fin de evitar la mezcla de los datos.

Por consiguiente, en la etapa posterior (orden de datos) resulto más sencillo organizar las curvas ingresadas. De esta manera al realizar el loft en la etapa final, el algoritmo no presenta errores, a pesar de que se varíen los parámetros de offset y subdivisión, como se puede apreciar en la fig. 16, sección [02a], [02b] y [02c].

En conclusión, este algoritmo cumple de mejor manera con la meta de generar iteraciones geométricas, bajo la modificación de parámetros como el offset y la subdivisión.

Fuente: elaboración propia, 2021.



<CARACTERÍSTICAS SECUNDARIAS PARA FABRICACIÓN>

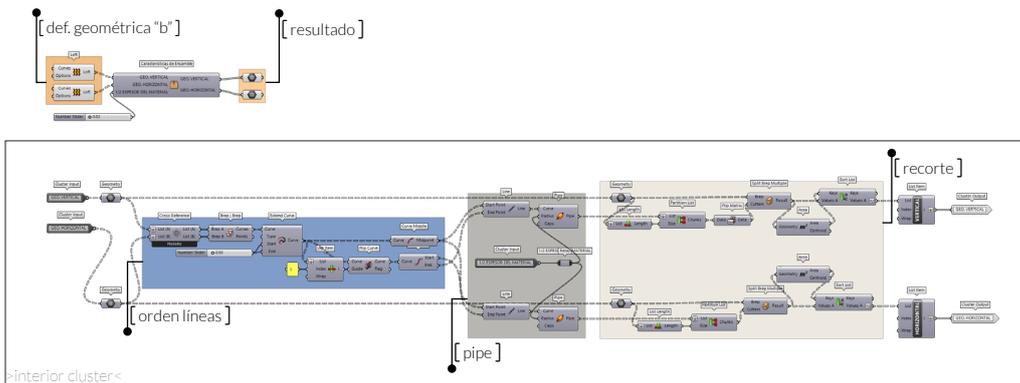


fig. 18 algoritmo para generar hendiduras de unión de piezas considerando el espesor del material.

Con relación al tema tratado previamente, es necesario sumar que, las piezas resultantes de la definición geométrica necesitan de elementos secundarios, ya sea externos o en su propia morfología, para poder ser llevados a la realidad.

A fin de dar respuesta a lo planeado, se establece un código donde las piezas en una dirección se recortan para coincidir con las hendiduras de las que se encuentran en el otro sentido.

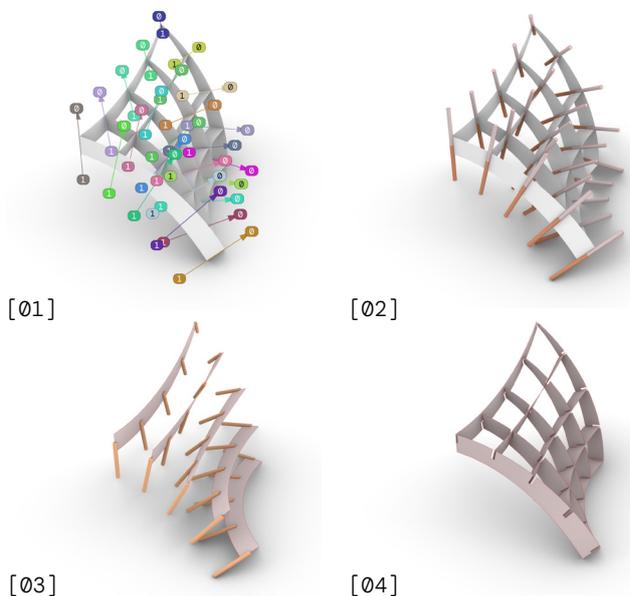
Para ejecutar esto, se posicionan y ordenan líneas en la intersección de las piezas como se aprecia en la fig. 18, sección [01].

A continuación, dichas líneas se dividen a la mitad para generar elementos "a" y "b" que recorten las piezas en distintas direcciones. Seguidamente, mediante el comando pipe se generan tubos, cuyo radio se modifica según el espesor del material con el que se desee fabricar la geometría.

Finalmente, se recortan las piezas en ambas direcciones con un grupo de tubos para cada una como se grafica en la fig. 18, sección [03], dando por resultado la geometría apreciada en la última imagen.

fig. 19 [01] posicionado y orden de líneas de intersección entre piezas. [02] tubos "a" y "b" para recortar el material según su espesor. [03] recorte de piezas en sentido V con tubos "a". [04] resultado del algoritmo.

Fuente: elaboración propia, 2021.



<PREPARACIÓN PARA CORTE EN CNC>

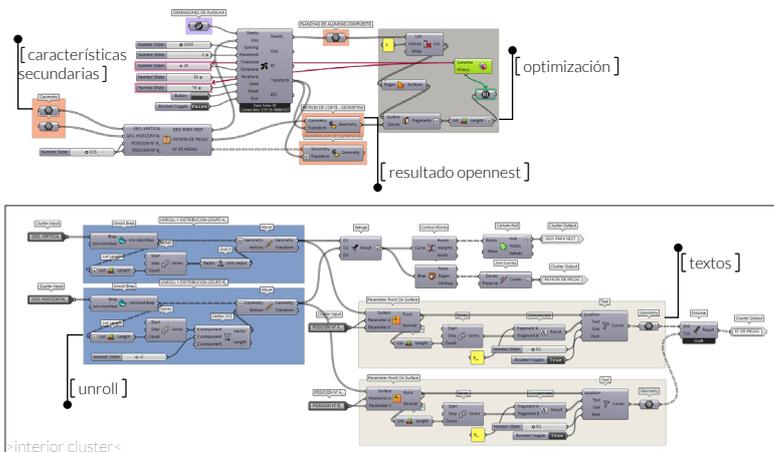


fig. 20 algoritmo de preparación para corte en CNC y optimización de piezas en una lamina.

fig. 21 [01] unroll de piezas en un plano y distribución equidistante. [02] numeración de piezas. [03] dimensión de placas del material a utilizar (aluminio compuesto). [04] resultado del algoritmo antes y después de optimizar la posición de piezas.

Fuente: elaboración propia, 2021.

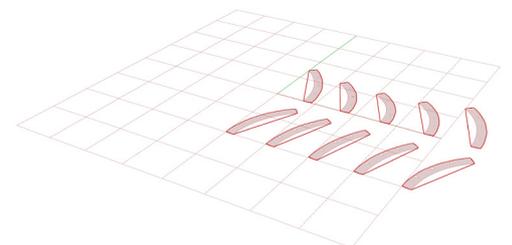
Como última etapa del proceso de fabricación, esta se plantea orientada a poder traducir los elementos geométricos a la documentación que solicita el instrumento con el que serán materializados, es decir, archivos DWG, DXF o el mismo código G con el que funciona la máquina.

Para ejecutar lo anterior, se comienza realizando un unroll a la geometría a fin de ser posicionada en un plano, además de distribuirla de manera equidistante para facilitar su visualización.

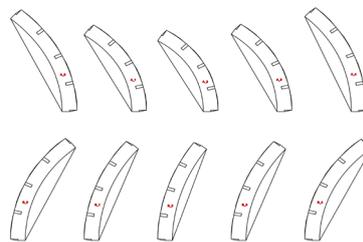
Luego se procede a catalogar cada una de las piezas, previendo que esto favorezca la eficiencia al momento de montar la geometría.

Para continuar, se utiliza el plugin opennest, en donde se ingresa una placa de las dimensiones del material a utilizar, en conjunto con las piezas descritas anteriormente. Con esto, el software busca distribuir los elementos de la manera más optima según algunos parámetros.

Finalmente, a causa de que los parámetros mencionados mejoran o empeoran el orden de manera casi aleatorios, se hace uso del componente galápagos, para probar una gran serie de valores y así determinar el más adecuado para distribuir las piezas.



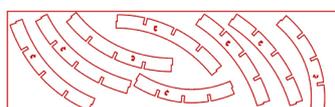
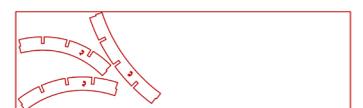
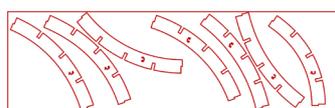
[01]



[02]



[03]

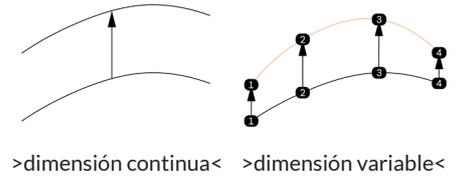


[04]

<EXPERIENCIA 04 - ALGORITMO INTEGRADO>

Como último punto de la investigación, se plantea poder establecer una definición que integre las variables de geometría, comportamiento estructural y fabricación del gyroid, maximizando la eficiencia de cada una de ellas con relación al caso de estudio.

En favor de esto, el desafío principal, se constituye en cómo abordar desde la fabricación, la información que entrega la simulación estructural. A lo cual, se propone establecer piezas de dimensión variable, generando así, un cambio conceptual en cómo abordar la geometría, tal como se grafica en la fig. 21, en donde se pasa de trabajar con curvas, a una idea en donde los puntos que las componen dan la opción de variabilidad.



<INTEGRACIÓN DE LA VARIABLES ENTREGADAS POR EL CALCULO>

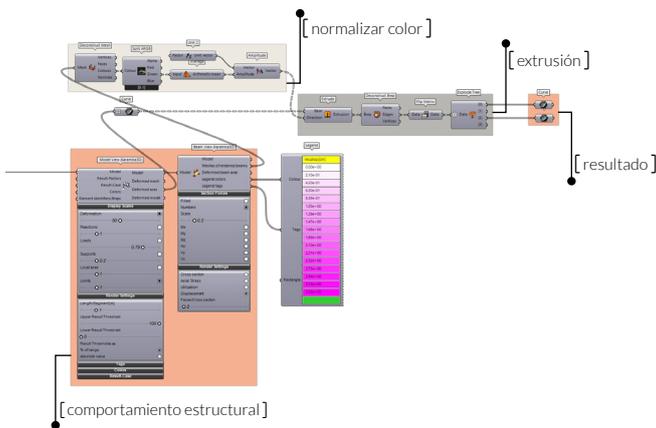


fig. 22 cambio conceptual de trabajar con curvas para dimensión continua a trabajar con puntos para dimensión variable.

fig. 23 Código para normalizar la gama de colores que entrega el calculo y traducirla a una geometría.

Para lograr lo propuesto anteriormente, se sigue el diagrama de deformación entregado por karamba 3D, fig. 12, con lo cual se plantea que las áreas con más color y por tanto mayor esfuerzo cuenten con valores de extrusión menores, generando que sean más pequeñas y por tanto más livianas, optimizando así la estructura y el uso de material desde la geometría.

Al analizar la gama de colores del diagrama, se descubre que la variación en escala RGB solo se da en el color verde, de modo que es posible normalizar este factor entre valores entre 0 y 1, consiguiendo que donde hay mayor deformación, la magnitud de extrusión tienda a 0, en otras palabras, sea menor.

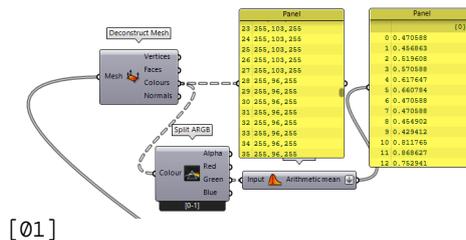
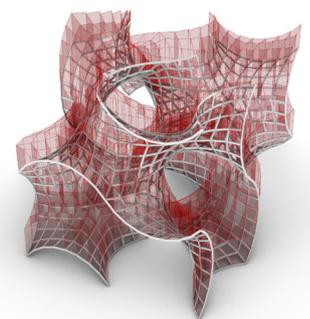


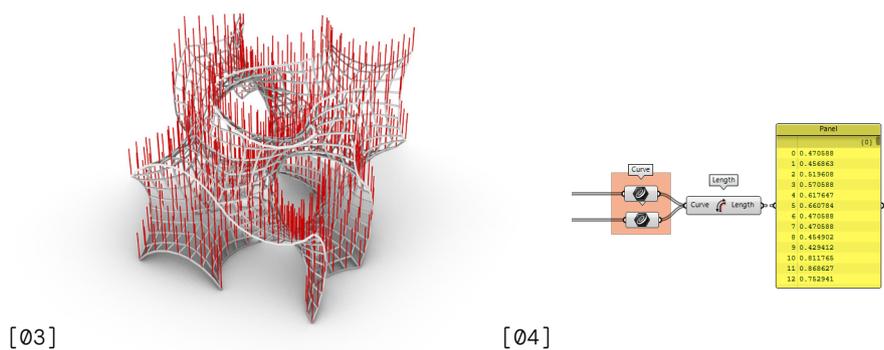
fig. 24 [01] interpretación de código de colores a valores entre 0 y 1. [02] extrusión en el eje z con valores normalizados entre 0 y 1. [03] extracción de líneas verticales de la extrusión a fin de tener el código de color interpretado a una geometría en un lugar específico. [04] medida de las líneas extraídas.

Fuente: elaboración propia, 2021.



Finalmente, mediante un pequeño código, se plasman los valores en una geometría para poder implementarse visualmente de manera conveniente, tanto por grupos de cifras como el orden que tendrán.

Cabe mencionar, que la geometría generada (líneas) se posicionan en la intersección de cada barra en el gyroid como se ve en la fig. 23, sección [03], por consiguiente, estas concuerdan con la localización de los verticies a extruir para generar una dimensión variable en las piezas, facilitando una vez más el orden.



<ALGORITMO DE DEFINICIÓN GEOMÉTRICA DE GYROID COMPLETO> "a"

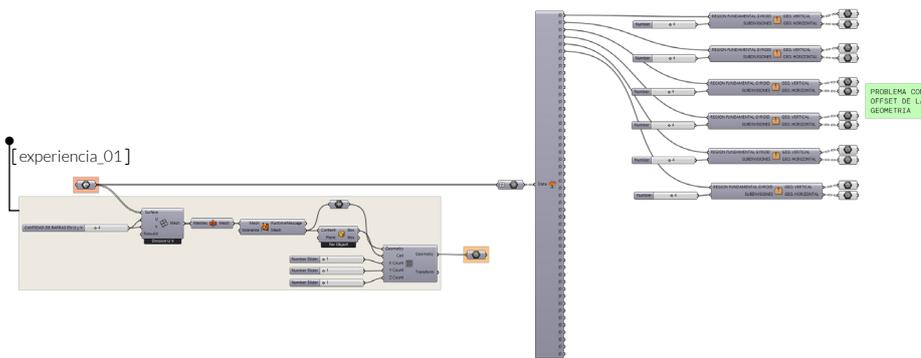
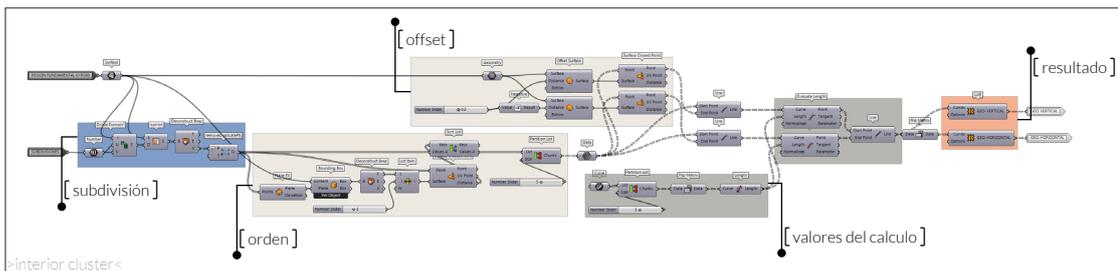


fig. 25 algoritmo "a" para definir de forma paramétrica la geometría del gyroid completo para fabricar.



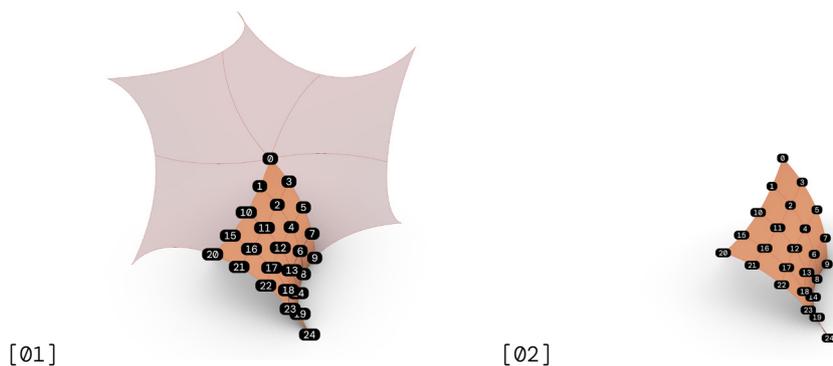
Para llevar a cabo la geometría propuesta, se hará uso de conceptos y etapas aprendidos en la experiencia de fabricación revisada anteriormente, sin embargo, por el cambio conceptual planteado para generar una dimensión variable en las piezas, será necesario mirar desde otro enfoque los procesos aplicados ahí.

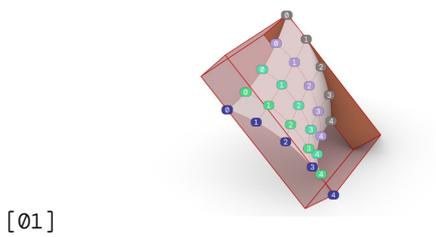
En primer lugar, se trabajará descomponiendo el gyroid en grupos, hasta su región fundamental, para posibilitar el trabajo a detalle de las piezas.

A continuación, se subdivide la superficie ingresada y se deconstruye para identificar sus vértices, como se grafica en la fig. 26, sección [02]. Luego, estos puntos pasan a una etapa de orden, donde mediante un bounding box el cual se posiciona según la superficie ingresada, son organizados en grupos, con los que más adelante se definirán las piezas del gyroid.

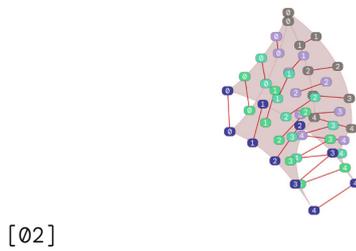
fig. 26 [01] fragmento del gyroid con región a trabajar [02] región del gyroid con puntos a extruir desordenados.

Fuente: elaboración propia, 2021.

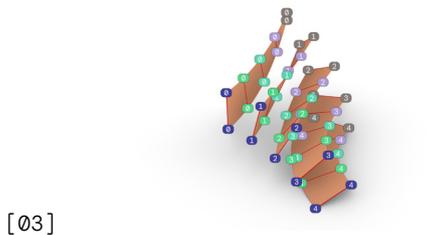




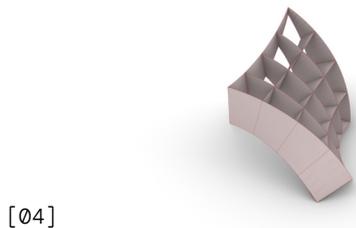
[01]



[02]



[03]



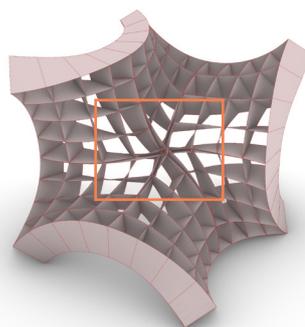
[04]

fig. 27 [01] orden y agrupamiento de puntos según bounding box repositionado a la región. [02] offset de la superficie inicial hacia cada lado con factor de 0,5 / atracción de puntos ordenados / generación de línea entre puntos iguales. [03] escalado de líneas según valor del cálculo y loft entre ellas. [04] resultado del algoritmo para una región del gyroid.

De forma paralela a lo relatado más arriba, se realiza un offset hacia ambas caras de la geometría a fin de evitar que se deformen excesivamente las piezas, además de atraer los puntos ordenados que se mencionaron en el párrafo anterior a cada una de las nuevas superficies, como se ve en la fig. 27, sección [02].

Seguidamente, se realiza una línea entre puntos homólogos, la cual se evalúa según los valores del cálculo, modificando su largo y generando la medida variable que se busca. Tras esto, se aplica un loft entre los segmentos reescalados en dirección U y V, fig. 27, sección [03], para establecer la geometría final.

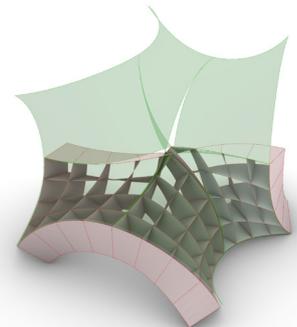
Por último, si bien el algoritmo funciona correctamente una vez completado un fragmento del gyroid, como se observa en la fig. 28, sección [01], se pudo evidenciar un error en el centro de la geometría, provocado por efectuar los offset de manera individual a las superficies en lugar de uno general para evitar el descase que se produce.



[01]

fig. 28 [01] fragmento del gyroid "error". [02] identificación de error por offset de regiones separadas.

Fuente: elaboración propia, 2021.



[02]

<ALGORITMO DE DEFINICIÓN GEOMÉTRICA DE GYROID COMPLETO> "b"

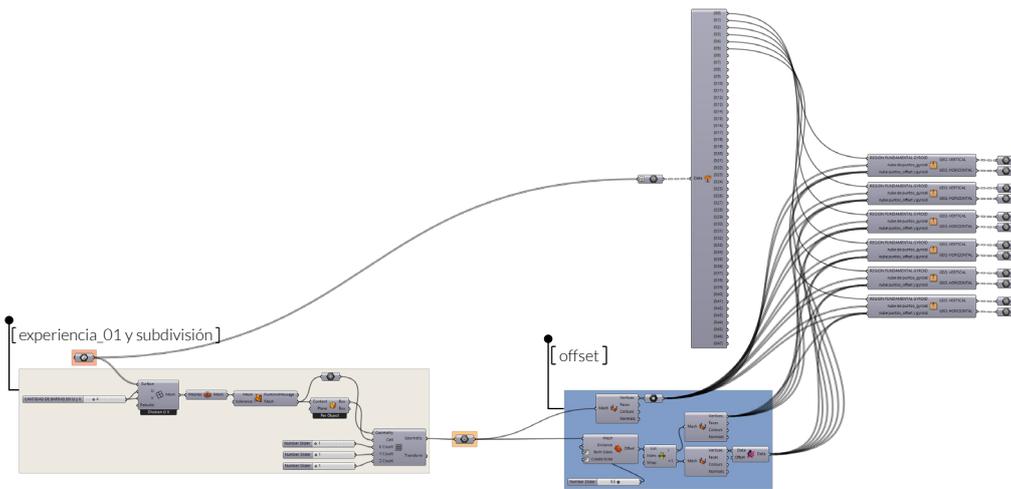


fig. 29 algoritmo "b" para definir de forma paramétrica la geometría del gyroid completo para fabricar.

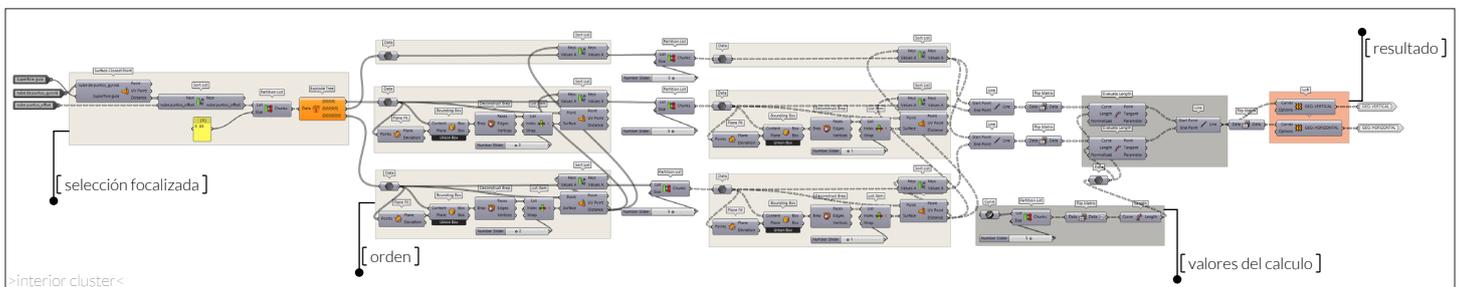
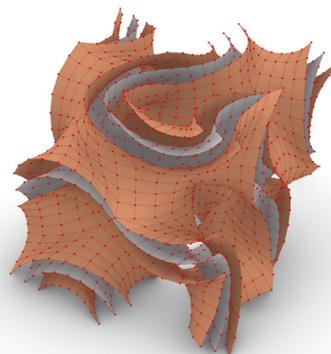


fig. 30 [01] offset de la geometría completa y deconstrucción para extraer los puntos. [02] nube de puntos generada por los offset y superficie guía para selección focalizada.

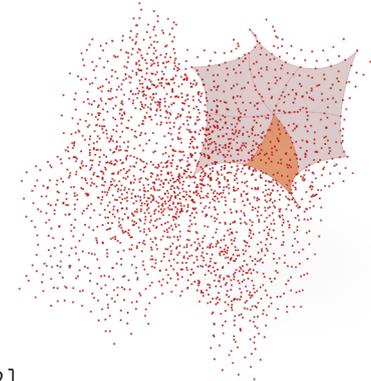
Fuente: elaboración propia, 2021.

A fin de, solventar el problema que presenta el algoritmo anterior, se aplica lo planteado en su último párrafo, es decir, llevar a cabo los offset a la geometría de manera general en un punto en el que esta se encuentre unida completamente, como se ve en la fig. 30, sección [01].

A causa de anterior, se suscita un nuevo desafío, ya que para trabajar en detalle la geometría, es necesario focalizarse en un área específica, lo que se dificulta por la nube de puntos que se genera. Para dar solución esto, se propone utilizar las superficies individuales del algoritmo pasado y así según un criterio de cercanía, seleccionar los puntos que equivalen a dichas zonas.



[01]



[02]

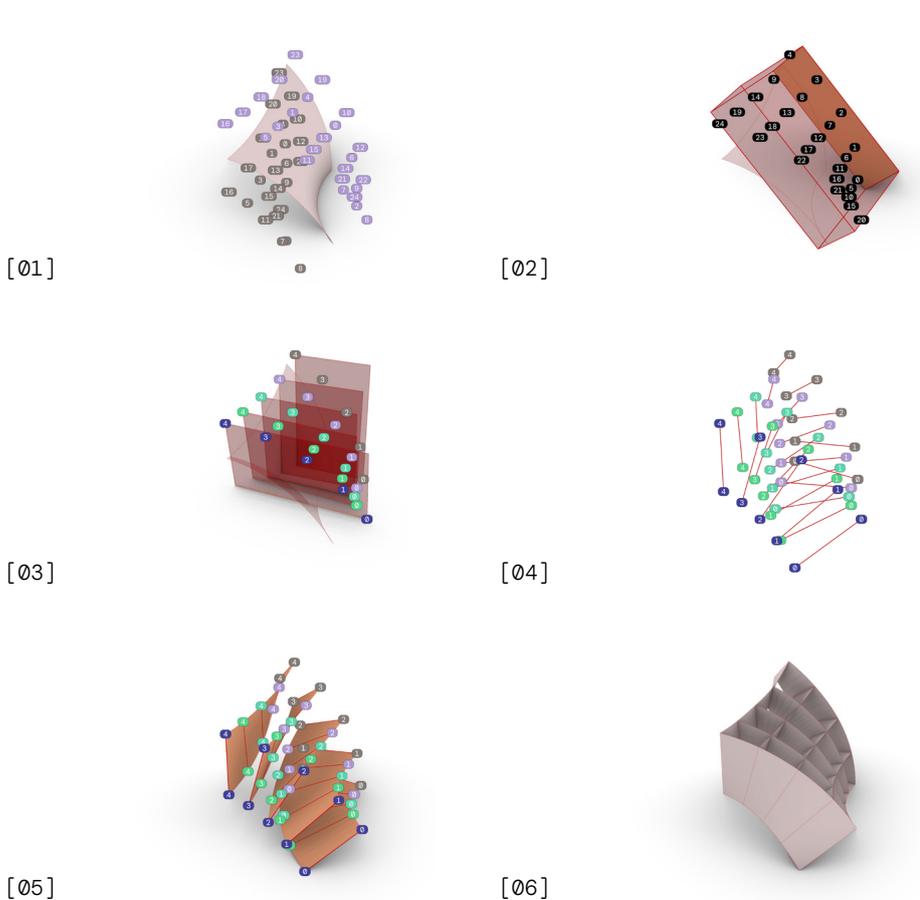


fig. 31 [01] selección focalizada de puntos por cercanía a la superficie guía. [02] primer orden de puntos según bounding box repositionada a la región. [03] agrupamiento y segundo orden de puntos según bounding box. [04] trazado de líneas entre puntos homólogos. [05] escalado de líneas según valor del cálculo y loft entre ellas. [06] resultado del algoritmo para una región del gyroid.

Como último obstáculo que genera esta reformulación del algoritmo previo, es que los puntos seleccionados no presentan un orden de datos, siendo necesario realizar dos procesos de organización utilizando un bounding box, como se evidencia en la fig. 31, sección [02] y [03].

Finalmente, luego de ordenar los datos, se realizan los mismos procedimientos de trazado, escalado y loft entre las líneas que se plantearon en el algoritmo pasado, generando de esta manera la geometría final que compone al gyroid sin ningún error.



fig. 32 fragmento del gyroid "acierto".

Fuente: elaboración propia, 2021.

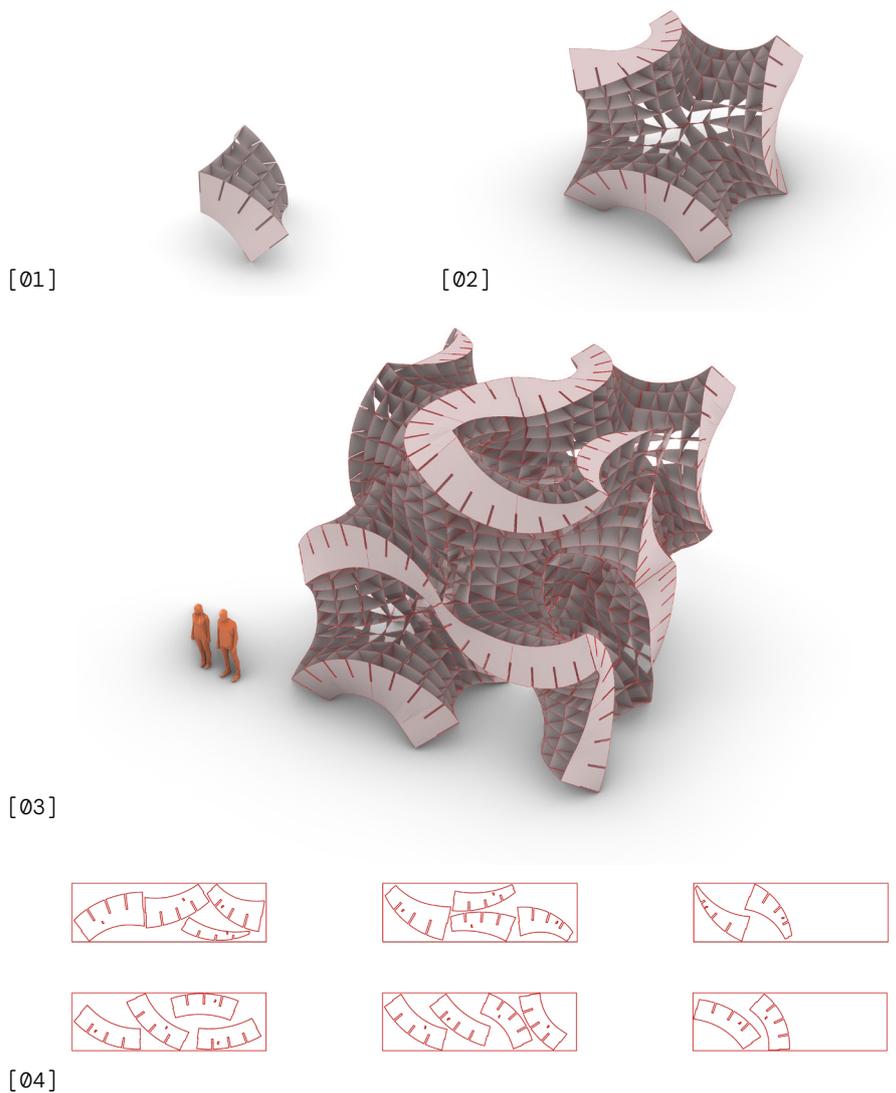
<EXPERIENCIA FINAL>

En cuanto a los dos últimos procesos que se plantean en la experiencia de fabricación, son aplicados de igual forma que se proponen ahí, generando como resultado las geometrías que se aprecia en la fig. 33, viendo así llevada a cabo la idea establecida de generar un espesor variable en las piezas que componen el gyoid, además de tener una focalización de este fenómeno según la solicitud que genera el comportamiento estructural.

Finalizando de esta manera la experiencia de integración de las variables de geometría, comportamiento estructural y fabricación del gyroid.

fig. 33 [01] región fundamental del gyroid traducida a la estructura propuesta. [02] fragmento del gyroid traducido a la estructura propuesta. [03] celda fundamental del gyroid traducido a la estructura propuesta. [04] piezas optimizadas para corte en CNC.

Fuente: elaboración propia, 2021.



<RESULTADOS>

Los resultados de esta investigación, se puede clasificar según las experiencias que se desarrollaron.

En cuanto a la **geometría**, de los tres algoritmos que se implementaron, el que dio mejores resultados para cumplir el objetivo de ser versátil para los procesos siguientes fue el de modelado siguiendo orden geométrico, pues cumple con los tres parámetros establecidos para evaluarlo, en primer lugar, presenta una continuidad geométrica al momento de funcionar como conjunto de elementos, en segundo lugar, presenta un orden poligonal claro, definido por cuadriláteros distribuidos homogéneamente según su posición en el gyroid y finalmente la polivalencia que tiene su algoritmo, posibilitando ir y venir desde diferentes escalas de la geometría.

En contraposición a lo anterior, el método más deficiente según el objetivo de arriba, fue el que utiliza el plugin chromodoris. Para empezar, carece de continuidad geométrica cuando funciona como conjunto de elementos, lo cual suscita un gran problema en el algoritmo puesto que este criterio es una característica propia del gyroid. Por otro lado, presenta un orden poligonal de triángulos falto de orden, resultando difícil su manipulación. Por último este método presenta poca variabilidad de uso ya que genera la geometría de manera casi instantánea, lo cual no es malo pero para este caso específico, si lo es.

En relación a la **escala arquitectónica y simulación estructural**, la experiencia requirió que hubiera un cambio en las dimensiones de la geometría por dos fundamentos, en primer lugar, que esta define el carácter arquitectónico del proceso y en segundo, que software estructural funciona en unidades de metros, generando que al ingresar variables en otra unidad, tanto los resultados como el funcionamiento del programa se vean afectados.

Por otra parte, la información que entrega

el plugin karamba 3d resultó útil para comprender el comportamiento en términos de deformación del gyroid bajo cargas, otorgando dos variables importantes, por un lado, que las mayores deformaciones se ubican en áreas en voladizo contrapuestas y por otro, que al funcionar como conjunto de elementos (2 o más gyroids unidos), estos suprimen una de sus áreas de deformación, logrando que independiente de la cantidad de elementos unidos, el conjunto siempre tendrá solo dos áreas con deformaciones importantes.

En terno de la **variable de fabricación digital**, presentó algunas de dificultades en la definición geométrica. La primera, fue que al enfrentar el gyroid completo, era inabordable para trabajar. Por lo que desconstruirlo hasta su región fundamenta y resolver algorímicamente su geometría a fin de replicarla hasta conformar el gyroid completo resultó la forma más eficaz de enfrentar el problema.

La segunda dificultad, se generó debido a que la geometría objetivo es una estructura de waffle con elementos en dirección U y V, siendo necesario un orden específico de datos para generarlos, de modo que, trabajar cada dirección de elementos por separado desde el inicio del algoritmo, garantiza el control sobre las variables generando así un método paramétrico y replicable para el gyroid.

Por último, adicional a las mencionadas, en la preparación para corte en CNC se produce la última dificultad de la experiencia, ya que como los materiales para fabricar vienen en dimensiones establecidas, luego de la primera prueba, fue necesario cuestionar las dimensiones de las piezas a fabricar y pensar en cómo aprovechar el material de la mejor manera desde la geometría y que no sea solo un resultado fortuito.

Acerca del **algoritmo integrado**, se generaron tres hitos de interacción para lograr el flujo de trabajo, en primer lugar, la concepción de piezas con dimensión variable

para vincular la fabricación y geometría con el cálculo, provocando un cambio conceptual para abordar los elementos, pasando de trabajar con una curva a tener que descomponerla en puntos y visualizar cada uno como una línea de movimiento.

En segundo lugar, la interpretación de la gama de colores entregada el comportamiento estructural para representar sus áreas de mayor esfuerzo, a una magnitud de escala para las piezas de la geometría, lo cual se efectuó por medio la normalización entre 0 y 1 de los valores de verde en escala RGB, ya que es el único que cambia. Haciendo posible generar que en las áreas con más esfuerzo la dimensión de las piezas sea menor por que tendera a 0.

Por último, para definir la celda unitaria del gyroid, se reformuló la manera de afrontar la geometría, realizando un offset general a esta con el fin de evitar descalces en la intersección de muchas regiones fundamentales. Por el offset mencionado, fue necesario generar una selección focalizada de puntos por medio de una superficie guía para continuar el proceso de trabajo en detalle de las piezas.

Finalmente, se puede establecer que las **variables transversales** tienen que ver con:

- _ La traducción y paso de variables del cálculo a la geometría fijándose como el factor generado por el diagrama de comportamiento estructural.

- _ La escala geométrica como elemento rector de toda los factores siguiente

- _ La organización de cada parte, como criterio de cambio de visión global a local.

<CONCLUSIONES>

Fruto de la experiencia, pude constatar que las variables transversales que se presentan al integrar el diseño, cálculo y fabricación digital, plantean de alguna manera un efecto en la expresión de la pieza final, con lo cual se identifican las siguientes. En primer lugar, escala geométrica, la cual actúa como elemento rector de los procesos, ya que determina la especialidad del elemento, el comportamiento estructural, la dimensión de las piezas a fabricar, entre otras situaciones.

En segundo lugar, la organización de cada parte, entendiéndose en el gyroid como la idea en que el espacio cartesiano ya no sirve directamente para ordenar los elementos, gracias a lo cual cambia la manera de enfrentar la geometría, pasando de una global y a una local y viceversa, como se pudo ver en las experiencias donde había que generar un sistema de orden, dentro de otro para organizar los datos.

Por último, los factores que establece el diagrama de comportamiento estructural como el elemento de vínculo directo entre el cálculo, la fabricación y la geometría, ya que la gama de colores se puede visualizar en el resultado final del algoritmo integrado pero traducida a una geometría fabricable, que además optimiza el uso de material al haber piezas con dimensión variable.

Con respecto al flujo de trabajo generado entre cosas tan diferentes a fin de lograr su integración, presento situaciones que funcionaron fluidamente y otras que no, en primer lugar, toda la conexión entre la geometría inicial y su integración a la fabricación fue bastante fluida, principalmente por la versatilidad de uso geométrico que tiene el algoritmo de extraído de la experiencia 01 y de igual manera entre la misma geometría y estructura. Ahora bien, el problema suscita en la conexión entre el cálculo y la fabricación el cual se ve dificultado primero, por tener que traducir la gama de colores a valores normalizados y en segundo, por la gran cantidad de datos que se entregan de manera desordenada, para

lo cual se planteó llevar dichos datos a una traducción geométrica (líneas) a fin de facilitar visualmente el orden de elementos y así propiciar el vínculo entre los dos procesos

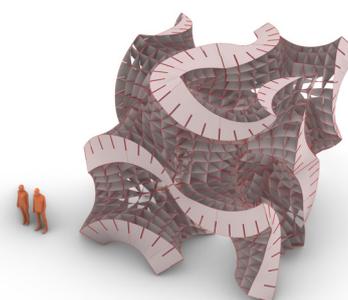
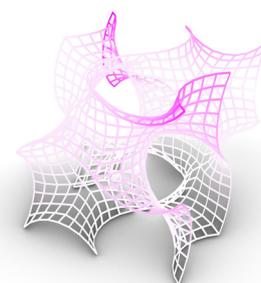
En términos personales, la realización de esta investigación significó enfrentarme a un área de la programación visual que desconocía. Provocando que el desarrollo del proceso fuera lento, pero no menos provechoso ya que cada avance significaba un proceso de ir y venir en que muchas veces llegaba a un punto muerto y debía volver a empezar con otro enfoque, aunque con todo el conocimiento adquirido, lo cual a fin de cuentas facilitaba el segundo intento.

Relacionado a lo anterior para efectuar dicho proceso fue necesario aprender una gran cantidad de software y plugins, en conjunto con un pulir y desarrollar habilidades de escritura e investigación con los que antes no contaba.

Por otro lado, como el trabajo está enfocado a integrar tres ejes en un solo proceso, implicó un cambio de mentalidad en relación con como ejecutar una propuesta, ya que, trabajar al mismo tiempo desde la geometría, la estructura y la fabricación me llevo a comprender que a medida que más se aprende de procesos ajenos a la arquitectura, se puede tener mayor control sobre ella y el elemento final.

fig. 34 contraste visual entre geometría resultante del algoritmo y esquema de deformación.

Fuente: elaboración propia, 2021.



<REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS>

- Abueidda, D., Elhebeary, M., Shiang, C., Pang, S., Abu Al-Rub, R., & Jasiuk, I. (2019). Mechanical properties of 3D printed polymeric Gyroid cellular structures: Experimental and finite element study. *ScienceDirect*, 165. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127519300176#f0065>
- Al-Ketan, O., & Abu Al-Rub, R. K. (2019, 1 octubre). Multifunctional Mechanical Metamaterials Based on Triply Periodic Minimal Surface Lattices. *ADVANCED ENGINEERING MATERIALS*, 21(10). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adem.201900524>
- de Wolf, C., Pomponi, F., & Moncaster, A. (2017, 1 abril). Measuring embodied carbon dioxide equivalent of buildings: A review and critique of current industry practice. *ScienceDirect*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778817302815>
- Downing, D., Jones, A., Braundt, M., & Leary, M. (2021, 1 enero). Increased efficiency gyroid structures by tailored material distribution. *ScienceDirect*, 197(109096). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127520306316>
- Fornes, M. (s. f.). A STRIPES-BASED MATERIAL SYSTEM. MARC FORNES / THEVERYMANY. Recuperado 1 de junio de 2021, de <https://theverymany.com/invention-of-stripes>
- Lee, J., Lee, Y., Lee, H., Koh, Y., & Kim, H. (2021). Improving mechanical properties of porous calcium phosphate scaffolds by constructing elongated gyroid structures using digital light processing. *ScienceDirect*, 47. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884220328686>
- Luo, J., Chen, L., Min, T., Shan, F., Kang, Q., & Tao, W. (2020). Macroscopic transport properties of Gyroid structures based on pore-scale studies: Permeability, diffusivity and thermal conductivity. *ScienceDirect*, 146. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0017931019320484>
- Ortega, J. A. (2016). *Fabricación digital: Introducción al modelado e impresión 3D*. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte-Área de Educación. https://books.google.es/books?id=9XmbDQAAQBAJ&dq=fabricacion+digital+&lr=&hl=es&source=gbs_navlinks_s
- Pineda, S., Arora, M., Williams, P. A., Kariuki, B. M., & Harris, K. (2016). The Grammar of Crystallographic Expression. *Cumincad*. http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia16_236
- Popescu, M. (2019). *KnitCrete: Stay-in-place knitted formworks for complex concrete structures* [Tesis de doctorado, ETH de Zürich]. <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/408640>
- Rossi, M., & Buratti, G. (2017). Form is Matter - Triply periodic minimal surfaces structures by digital design tools. *Cumincad*. http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ecaade2017_306
- Schoen, A. H. (1970). *Infinite Periodic Minimal Surfaces Without Self-intersections*. National Aeronautics and Space Administration. https://books.google.cl/books?id=LxOb_NIMLtMC&dq=INFINITE+PERIODIC+MINIMAL+SURFACES+WITHOUT+SELF-INTERSECTIONS&lr=&hl=es&source=gbs_navlinks_s
- Tenu, V. (2010). *Minimal Surfaces as Self-organizing Systems*. *Cumincad*. http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/U=&P=http/Show?acadia10_196
- NCD Risk Factor Collaboration (NCD-RisC). (2019). Evolution of height over time. *NCD-RisC*. Recuperado 9 de noviembre de 2021, de <https://www.ncdrisc.org/index.html>
- Yang, E., Leary, M., Lozanovski, B., Downing, D., Mazur, M., Sarker, A., Khorasani, A., Jones, A., Maconachie, T., Bateman, S., Easton, M., Qian, M., Choong, P., & Brandt, M. (2019). Effect of geometry on the mechanical properties of Ti-6Al-4V Gyroid structures fabricated via SLM: A numerical study. *ScienceDirect*, 184. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127519306033>