VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

RETÍCULAS BIOINSPIRADAS: UNA REVISIÓN DE LA RUTA DE BIOMÍMESIS, MANUFACTURA ADITIVA Y SIMULACIÓN

Bio-inspired Lattices: A Review of the Biomimicry, Additive Manufacturing, and Simulation Pathway

Estrella Vanessa Arreguin Esparza[1], Josué Ibarra Rivera[1], Felipe Rivero Rozada[1], José Juan Carreon Barrientos[1], Alan Joaquin Arias Diosdado[2] , Francisco Antonio Horta Rangel[2]

[1]Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato
pepecarreon@ugto.mx
[2]Division de ingenierías Campus Guanajuato
anthort@ugto.mx

Resumen

El presente artículo consolida una ruta metodológica y experimental desarrollada para transformar principios geométricos observados en sistemas biológicos en prototipos de ingeniería diseñables, fabricables y evaluables. Lejos de asumir la naturaleza como una fuente de formas decorativas, el trabajo organiza una secuencia verificable que vincula observación biológica, abstracción funcional, diseño paramétrico, manufactura aditiva, simulación por elementos finitos y validación experimental preliminar. Con este enfoque, se revisa el papel de las retículas bioinspiradas, de la topología estructural, de la distribución de material y de las condiciones de frontera en el desempeño mecánico de geometrías tipo domo. La revisión se apoya en literatura sobre biomímesis estructural, manufactura aditiva y análisis numérico, y se ilustra mediante un caso de estudio con variantes de cascarón fabricadas y evaluadas de manera preliminar. Los resultados muestran que, para una masa y una geometría determinadas, la respuesta frente al pandeo y la deformación no depende únicamente del material empleado, sino también de la organización reticular, la concentración local de esfuerzos y la forma en que se idealiza la carga durante la simulación. En conjunto, el artículo propone una lectura rigurosa de la biomímesis estructural como proceso reproducible de observación, modelado, fabricación y evaluación, capaz de convertir principios naturales en soluciones ligeras, funcionales y comparables.

Palabras clave: biomímesis; manufactura aditiva; método de elementos finitos; pandeo; retículas; Voronoi.

Introducción

La transferencia de principios biológicos al diseño de ingeniería —conocida como biomímesis o biomimética— ha crecido de forma sostenida como estrategia para concebir estructuras eficientes en el uso del material (Vincent et al., 2006). Sin embargo, esa transferencia enfrenta una dificultad conceptual persistente: la semejanza visual con un organismo no garantiza que una pieza reproduzca su comportamiento mecánico. Una forma natural puede inspirar un objeto estéticamente atractivo sin que ello implique ventaja estructural alguna. De ahí la necesidad de un procedimiento que traduzca la forma en reglas geométricas, materiales, modelos y ensayos verificables, distinguiendo lo que podría llamarse biomímesis decorativa de una biomímesis verificable.

Un referente biológico particularmente valioso para abordar este problema es *Euplectella aspergillum* (figura 1), una esponja de vidrio de aguas profundas del Pacífico occidental, sésil y filtradora. Su esqueleto tubular de sílice presenta una cuadrícula reforzada por una doble familia de diagonales cruzadas, organizada jerárquicamente desde la nanoescala hasta la macroestructura (Aizenberg et al., 2005). Este esqueleto ha motivado estudios de eficiencia estructural (Brown et al., 2019), de resistencia al pandeo (Fayemi et al., 2017) y, más recientemente, de interacción con el flujo y de optimización computacional multiobjetivo (Falcucci et al., 2021) (Meier et al., 2026), lo que lo convierte en un caso idóneo para examinar la ruta completa que va de la observación biológica al prototipo evaluable.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx



Figura 1. Euplectella aspergillum en su ambiente profundo, empleada como referente biológico y no como molde literal. Fuente: NOAA Okeanos Explorer Program, Gulf of Mexico 2012 Expedition, Wikimedia Commons, licencia CC BY 2.0 [11].

El estudio de la función mecánica de estas estructuras demuestra que la incorporación de diagonales modifica de manera sustancial la forma en que una pieza conduce las cargas. En una cuadrícula ortogonal, una solicitación lateral tiende a deformar las celdas cuadradas transformándolas en romboides; la introducción de diagonales genera, en cambio, triángulos —una configuración geométricamente estable que distribuye fuerzas, reduce desplazamientos laterales y retrasa la aparición de modos de pandeo, entendido este como el doblamiento súbito de un elemento esbelto sometido a compresión—. Fernandes y colaboradores cuantificaron esta ventaja mediante una combinación de simulación por elementos finitos y ensayos sobre especímenes impresos en 3D, y demostraron que la estrategia de refuerzo en doble diagonal inspirada en Euplectella aspergillum alcanza la mayor resistencia al pandeo para una cantidad dada de material, superando a las configuraciones reticulares tradicionales (Fernandes et al., 2021). Este resultado es central para la presente revisión, pues sustenta la idea de partida: el rasgo relevante para la transferencia biomimética no es la semejanza visual con el organismo, sino la conservación de una regla estructural verificable. La Figura 2 esquematiza el principio de la envolvente diagonal (a) y lo contrasta con un ejemplo tangible: el edificio 30 St Mary Axe (b), conocido como The Gherkin, cuyo patrón diagrid constituye una aplicación construida de este mismo principio en la arquitectura de torres.

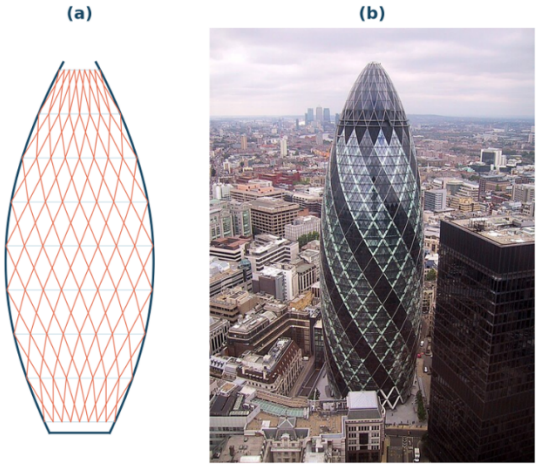


Figura 2. (a) Esquema de una envolvente diagonal o diagrid; las diagonales generan caminos de carga y reducen la deformación lateral, principio con precedentes en la arquitectura de torres. Elaboración propia. (b) Edificio 30 St Mary Axe (The Gherkin), en la City de Londres (diseñado por el estudio de Norman Foster, 2001-2003), ejemplo construido de envolvente diagrid en el que se aprecia el patrón de diagonales cruzadas de su fachada.Wikimedia Commons, licencia CC BY-SA 3.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0), sin modificaciones.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Junto a la red ordenada asociada *a Euplectella aspergillum*, la literatura sobre estructuras celulares considera también topologías irregulares, entre las que destacan las retículas de Voronoi, en las que el espacio se divide en celdas alrededor de puntos generadores. Estas dos familias representan filosofías de diseño distintas —regularidad y redundancia frente a irregularidad y adaptación local— y su comparación resulta pertinente porque el aligeramiento de una estructura no equivale a retirar material de manera arbitraria, sino a decidir dónde conservarlo y dónde abrir espacio. Un diseño inadecuado, en cualquiera de las dos filosofías, puede generar concentraciones de esfuerzo, fracturas locales o fallas prematuras. La Figura 3 contrasta ambas topologías.

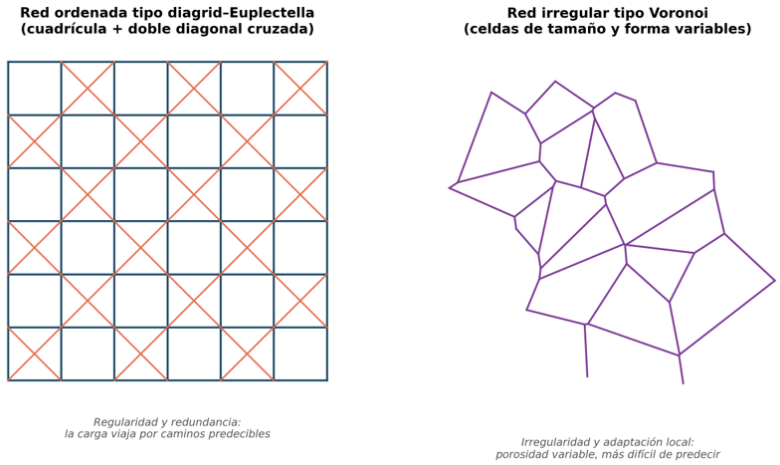


Figura 3. Contraste entre una red ordenada de tipo diagrid y una red irregular de tipo Voronoi. La primera ofrece caminos de carga más predecibles; la segunda explora porosidad y adaptación local. Elaboración propia.

Este trabajo propone organizar la literatura alrededor de una cadena de transferencia de siete etapas (Figura 4), que ordena de manera sistemática los pasos y los cuidados metodológicos necesarios para pasar de un referente biológico a una estructura verificable. Su aplicación se ilustra mediante un caso de estudio de tres variantes de domos fabricados mediante manufactura aditiva y evaluadas de manera preliminar.

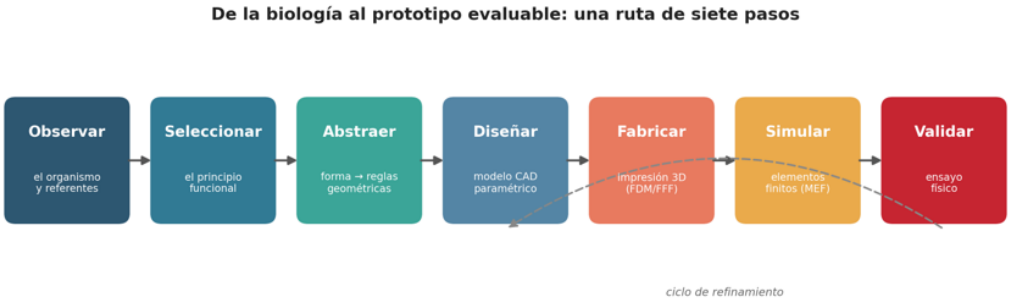


Figura 4. Ruta de transferencia biomimética en siete etapas, desde la observación del organismo hasta la validación física, con un ciclo de refinamiento. Elaboración propia.

Se declara, en cumplimiento de las buenas prácticas de transparencia, que en la preparación del manuscrito se emplearon herramientas de inteligencia artificial como apoyo en la redacción, la revisión de estilo y la elaboración de las figuras esquemáticas de autoría propia. Las fotografías de prototipos y los mapas de simulación proceden del caso de estudio y no fueron generados con inteligencia artificial. Las imágenes conceptuales de las propuestas de diseño arquitectónico (Figuras 13 y 14) se generaron con herramientas de inteligencia artificial generativa a partir de instrucciones del autor, y se presentan explícitamente como ilustraciones conceptuales, no como estructuras construidas ni como resultados experimentales. La responsabilidad del contenido corresponde a la autoría.

Metodología

La ruta metodológica se organizó en seis etapas que van de la observación biológica al prototipo evaluable (Tabla 1): observación, selección crítica, abstracción funcional, diseño paramétrico, manufactura aditiva y simulación y validación. A continuación, se describe el desarrollo de cada una.

Etapa	Qué se realizó o quedó definido
1. Observación	Revisión de formas naturales y tecnológicas potencialmente útiles
2. Selección crítica	Elección del organismo referente central
3. Abstracción funcional	Conversión del referente en variables: altura, diámetro, anillos, meridianos/longitudinales, diagonales, espesor de barra, porosidad y material.
4. Diseño paramétrico	Generación de variantes comparables de domos y retículas para estudiar cómo cambia la distribución de material.
5. Manufactura aditiva	Fabricación preliminar por FDM de prototipos impresos, considerando espesor mínimo, continuidad de barras, nodos, soportes y orientación de impresión.
6. Simulación y validación	Ejecución parcial de simulaciones FEM y pruebas de compresión preliminares, con registro de limitaciones y pendientes de cierre experimental.

Tabla 1 Etapas de la ruta metodológica. Elaboración propia.

Observación y selección crítica del referente biológico

Se realizó una búsqueda bibliográfica orientada a identificar organismos y formas potencialmente útiles como caso de estudio, entre ellas Euplectella, radiolarios, diatomeas, bambú, hueso trabecular, y las topologías diagrid y Voronoi. A partir de esta revisión se seleccionó a Euplectella como referente central, debido a su retícula tubular jerárquica y a su doble refuerzo diagonal, ampliamente reportado en la literatura como una estrategia eficiente de resistencia al pandeo.

Abstracción funcional y diseño paramétrico

El referente biológico se abstrajo en un conjunto de variables de diseño: altura, diámetro, número de anillos, elementos meridianos/longitudinales, diagonales, espesor de barra, porosidad y material. Con base en estas variables se generaron, en Fusion 360, tres domos inspirados en Euplectella, en la retícula de Voronoi y en geometrías fractales. Adicionalmente, se incorporaron dos geometrías de referencia para comparación: un domo geodésico, de patrón triangular ampliamente conocido en la práctica constructiva, y un domo semiesférico continuo, sin porosidad, que funge como línea base sólida. La Tabla 2 resume las cinco configuraciones evaluadas.

Diseño	Descripción
Diagrid-Euplectella	Retícula ordenada con diagonales cruzadas sobre una geometría tipo domo.
Domo Geodésico	Cúpula con patrón triangular.
Domo Semiesférico	Cúpula continua de referencia.
Domo Sierpinski	Cúpula con perforación fractal.
Domo Voronoi	Cúpula con retícula irregular.

Tabla 2 configuraciones evaluadas. Elaboración propia.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Simulación y validación numérica

Sobre todos los modelos se realizó una simulación de esfuerzo estático, en el mismo software de diseño, aplicando una fuerza normal de 20 N y de 55 N sobre un disco de 10 mm de diámetro colocado en la superficie del domo. De cada simulación se obtuvieron el esfuerzo de Von Mises y el desplazamiento, en milímetros. Asimismo, se registró la masa de cada domo, lo que permitió calcular dos indicadores adicionales: la densidad relativa —definida como el porcentaje de masa del domo poroso respecto a la masa del domo sólido— y la relación entre el factor de seguridad y la masa del material, empleada como indicador de resistencia por gramo de material.

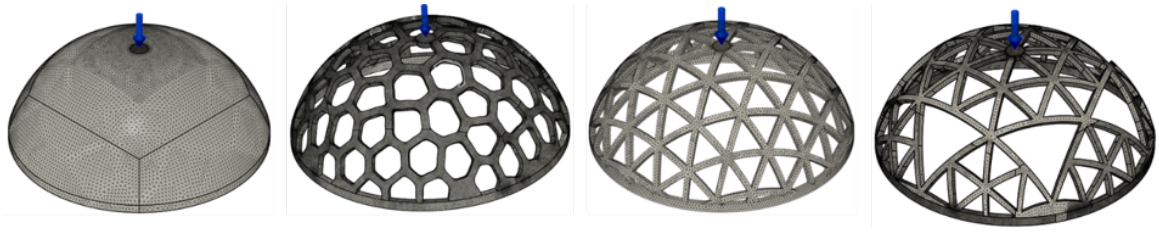


Figura 5. Representación del esfuerzo normal sobre la superficie del domo. Elaboración propia.

La tabla 3 resume las características de la malla y el material utilizado para las simulaciones.

Configuración	
General	
Tolerancia de contacto	0.10 mm
Eliminar los modos de cuerpos rígidos	No
Malla	
Tamaño medio de elemento (% del tamaño del modelo) - Sólidos	2
Escala de tamaño de malla por pieza	Sí
Tamaño medio de elemento (valor absoluto)	-
Orden de elemento	Parabólico
Crear elementos de malla curva	Sí
Ángulo de giro máx. en curvas (grad.)	15
Relación de tamaño máx. de malla adyacente	1.5
Relación de aspecto máxima	10
Tamaño mínimo de elemento (% del tamaño medio)	20
Refinado de malla adaptable	
Número de pasos de refinado	4
Tolerancia de convergencia de resultados (%)	10
Parte de los elementos para refinar (%)	25
Resultados para la precisión de la línea base	Tensión de von Mises
Materiales	
Plástico ABS	
Componentes	
Componente	Resistencia
Esfera	Límite de elasticidad
Propiedades	
Densidad	1.060E-06 kg / mm^3
Módulo de Young	2240.00 MPa
Coeficiente de Poisson	0.38
Límite de elasticidad	20.00 MPa
Resistencia máxima a tracción	29.60 MPa
Conductividad térmica	1.600E-04 W / (mm C)
Coeficiente de dilatación térmica	8.570E-05 / C
Calor específico	1500.00 J / (kg C)

Tabla 3. Configuración de la malla y el material del estudio. Elaboración propia.

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Manufactura aditiva

Para asegurar condiciones comparables entre los modelos, todos los domos impresos se fabricaron con el mismo tamaño: 145 mm de diámetro de base y 3 mm de espesor de pared. La impresión 3D se realizó en impresoras Artillery Sidewinder X1, con los siguientes parámetros: altura de capa de 0.2 mm, temperatura de boquilla de 240 °C, temperatura de cama de 80 °C, relleno del 100 % y velocidad de impresión de 120 mm/s. En todos los casos se emplearon soportes de impresión.

Ensayo experimental de compresión

Para complementar la simulación numérica con evidencia física, se construyó un equipo experimental mediante impresión 3D, diseñado para colocar un peso sobre el domo y transmitir la fuerza en un eje vertical directamente sobre el punto de interés de la estructura. Cada domo se colocó sobre una balanza para registrar su peso, y el desplazamiento producido por la deformación se midió con un vernier. Los ensayos se realizaron aplicando cargas de 0.5 kg, 2 kg y 10 kg sobre cada prototipo.



Figura 6. Dispositivo experimental de compresión: báscula digital para la lectura de carga y calibre digital para el desplazamiento. Corresponde a una etapa académica de validación inicial. Elaboración propia.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Resultados

Bajo una carga normal de 20 N aplicada sobre un disco de 10 mm de diámetro, el domo Geodésico presentó un desplazamiento (0.029 mm) prácticamente equivalente al del domo sólido de referencia (0.027 mm), pese a emplear una fracción considerablemente menor de material. Los domos Voronoi y Sierpinski, en cambio, mostraron desplazamientos entre 3.6 y 4.1 veces mayores (0.098 mm y 0.112 mm, respectivamente) (Tabla 4). Este contraste indica que no toda topología reticulada logra la misma eficiencia estructural con una cantidad de material comparable. El mapa de esfuerzos de la Figura 7 permite matizar esta primera lectura. Aunque el desplazamiento del domo Geodésico fue similar al del sólido, su esfuerzo de Von Mises máximo (10.47 MPa) resultó casi seis veces mayor que el del domo sólido (1.85 MPa), y del mismo orden que el de Voronoi (11.12 MPa) y Sierpinski (10.51 MPa). Los tres diseños reticulados redujeron su masa entre 54 % y 63 % respecto al domo sólido (densidades relativas de 37.4 % a 46.3 %).

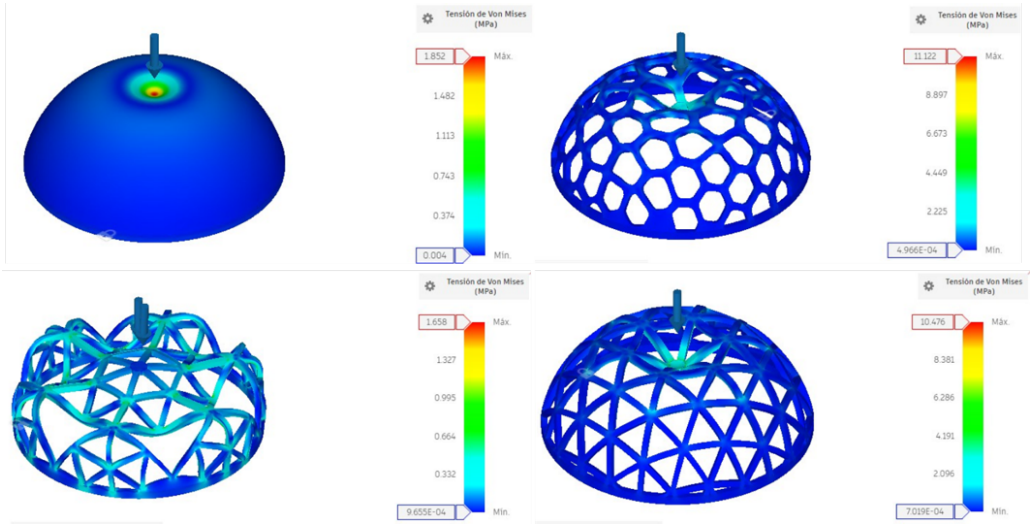


Figura 7. Resultados de esfuerzo de los diseños sometidos a una fuerza de 20 N. Representación amplificada 2x. Elaboración propia.

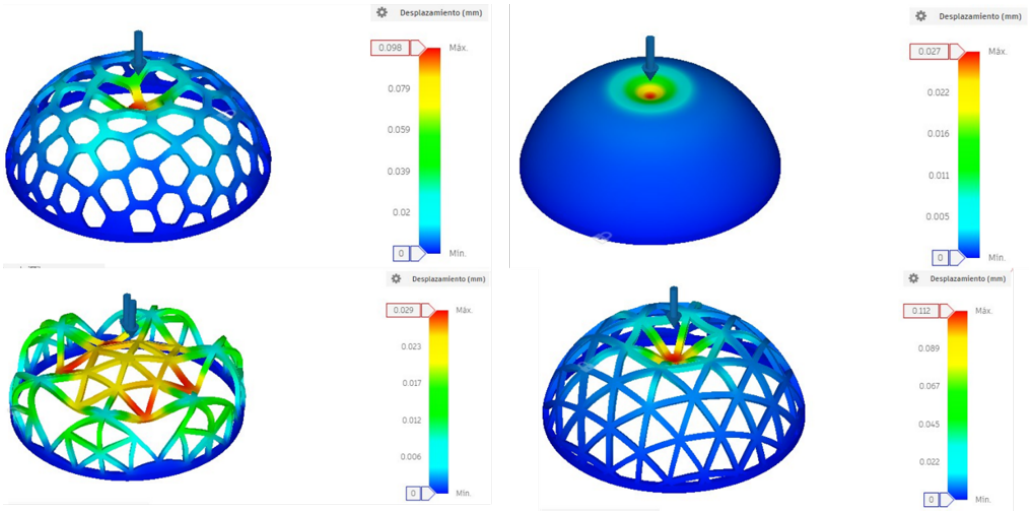


Figura 8. Resultados de desplazamiento de los diseños sometidos a una fuerza de 20 N. Representación amplificada 2x. Elaboración propia.

Domo	Von Mises Max (MPa)	Desplazamiento (mm)	Masa (g)	Densidad relativa (%)
Semiesfera	1.85	0.027	85.6	100
Voronoi	11.12	0.098	37.9	44.3
Geodesico	10.47	0.029	39.6	46.3
Serpinsky	10.51	0.112	32	37.4

Tabla 4. Resumen de resultados de los diseños sometidos a un esfuerzo de 20 N. Elaboración propia.

Al incrementar la carga a 55 N, la brecha entre el domo sólido y los diseños reticulados se amplía de forma marcada. El domo sólido se mantuvo dentro del régimen elástico, con un esfuerzo máximo de 5.09 MPa —todavía muy por debajo del límite de 20 MPa— y un desplazamiento de apenas 0.075 mm. Los tres diseños reticulados, en cambio, superaron el límite de elasticidad del material: Geodésico alcanzó 28.8 MPa, Sierpinski 29.7 MPa y Voronoi 61.7 MPa (Tabla 5), lo que indica que, en la zona de contacto, el material entraría en régimen de deformación plástica y no meramente elástico. Los desplazamientos siguieron la misma tendencia, con Voronoi como el diseño más flexible (0.545 mm, más de siete veces el del domo sólido) y Geodésico como el más rígido de los tres reticulados (0.308 mm).

Las Figuras 9 y 10 muestran, además, que el crecimiento del esfuerzo y del desplazamiento entre 20 N y 55 N no es proporcional entre diseños: mientras el domo sólido escala de forma cercana a lo esperado por la razón de fuerzas (55/20 ≈ 2.75), Voronoi multiplica su esfuerzo máximo por 5.5 y su desplazamiento por 5.6, muy por encima de esa razón. Esto sugiere que, conforme aumenta la carga, la concentración de esfuerzo en los nodos y barras de las topologías reticuladas se agrava de forma no lineal, en tanto el material se acerca a su límite elástico.

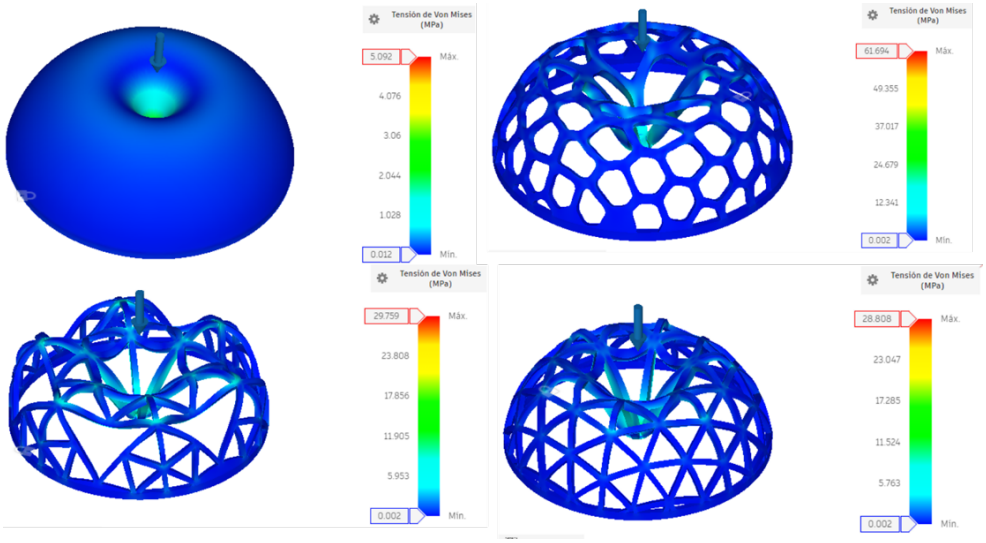


Figura 9. Resultados de esfuerzo de los diseños sometidos a una fuerza de 55 N. Representación amplificada 2x. Elaboración propia.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

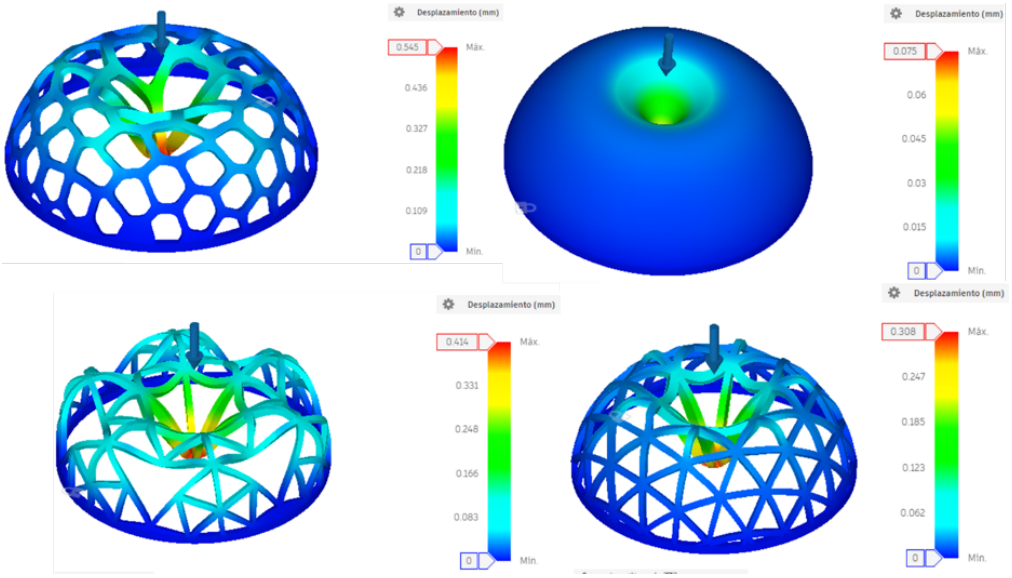


Figura 10. Resultados de desplazamiento de los diseños sometidos a una fuerza de 55 N. Representación amplificada 2x. Elaboración propia.

Domo	Von Mises Max (MPa)	Desplazamiento (mm)
Semiesfera	5.092	0.075
Voronoi	61.7	0.545
Geodesico	28.8	0.308
Serpinsky	29.7	0.414

Tabla 5. Resumen de resultados de los diseños sometidos a un esfuerzo de 55 N. Elaboración propia.

Los ensayos físicos, realizados con cargas progresivas de 0, 2, 5.5 y 10 kg, coinciden cualitativamente con la tendencia observada en la simulación. El domo Geodésico exhibió el menor desplazamiento total (Δ = 1.5 mm), ligeramente inferior incluso al del domo sólido (Δ = 1.6 mm), mientras que Voronoi y Sierpinski presentaron los mayores desplazamientos (Δ = 3 mm en ambos casos), es decir, el doble que el sólido y el geodésico (Tabla 6). La Figura 11 muestra esta misma tendencia de forma gráfica: las curvas de fuerza contra desplazamiento de Voronoi y Sierpinski se separan claramente de las de Semiesfera y Geodésico, que se mantienen más próximas entre sí a lo largo de todo el rango de carga ensayado. Este orden relativo —geodésico y sólido como las configuraciones experimentalmente más rígidas, frente a Voronoi y Sierpinski como las más flexibles— es consistente con el comportamiento observado en las simulaciones bajo carga de 55 N, lo que da soporte experimental preliminar a la tendencia predicha teóricamente.

Diseño	Masa (Kg)	Desplazamiento (mm)	Δ desplazamiento (mm)
Semiesfera	0	47.6	-
	2	47.5	0.1
	5.5	47.2	0.4
	10	46	1.6
Voronoi	0	47.1	-

	2	46.7	0.4
	5.5	45.8	1.3
	10	44.1	3
Geodésico	0	47.2	-
	2	46.6	0.6
	5.5	46.3	0.9
	10	45.7	1.5
Serpinsky	0	47.1	-
	2	46.5	0.6
	5.5	45.8	1.3
	10	44.1	3

Tabla 6. Resultados experimentales de desplazamiento de los distintos domos). Elaboración propia.

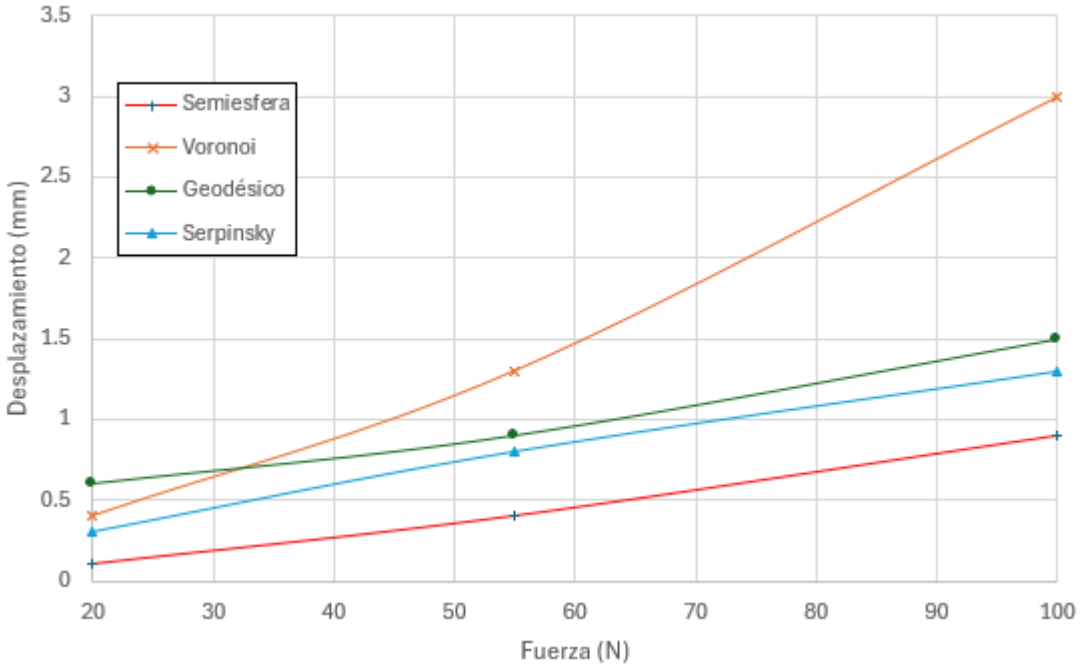


Figura 11. Gráfico de fuerza contra desplazamiento medido experimentalmente. Representación amplificada 2x. Elaboración propia.

La Figura 12 contrasta directamente las curvas de fuerza-desplazamiento medidas experimentalmente con las obtenidas por simulación. Como puede apreciarse, la coincidencia entre ambos conjuntos de resultados es únicamente cualitativa: en magnitud absoluta, el desplazamiento simulado (del orden de centésimas de milímetro) y el medido experimentalmente (del orden de decenas de milímetros) difieren en varios órdenes de magnitud, por lo que los valores teóricos y experimentales no deben tratarse como directamente comparables entre sí, sino como dos aproximaciones independientes que se contrastan en su tendencia relativa. Una causa probable de esta discrepancia es que el modelo de elementos finitos empleó las propiedades del material ABS cargadas por defecto en la biblioteca de materiales de Fusion 360, correspondientes a un material idealizado, homogéneo e isotrópico. El ABS efectivamente impreso por FDM, en cambio, no necesariamente conserva esas propiedades: la adhesión entre capas, la orientación de impresión, el patrón y porcentaje de relleno, y la posible presencia de microvacíos introducen un

comportamiento anisotrópico —con propiedades mecánicas distintas según la dirección de análisis— que puede diferir sustancialmente de los valores nominales del material sólido, tal como reportan Ahn et al. (2002) para piezas de ABS fabricadas por modelado por deposición fundida. Aunque el material simulado y el material impreso comparten el nombre "ABS", no necesariamente comparten el mismo módulo de Young, límite de elasticidad ni resistencia a la tracción, lo que basta para explicar buena parte de la brecha entre el desplazamiento teórico y el experimental.

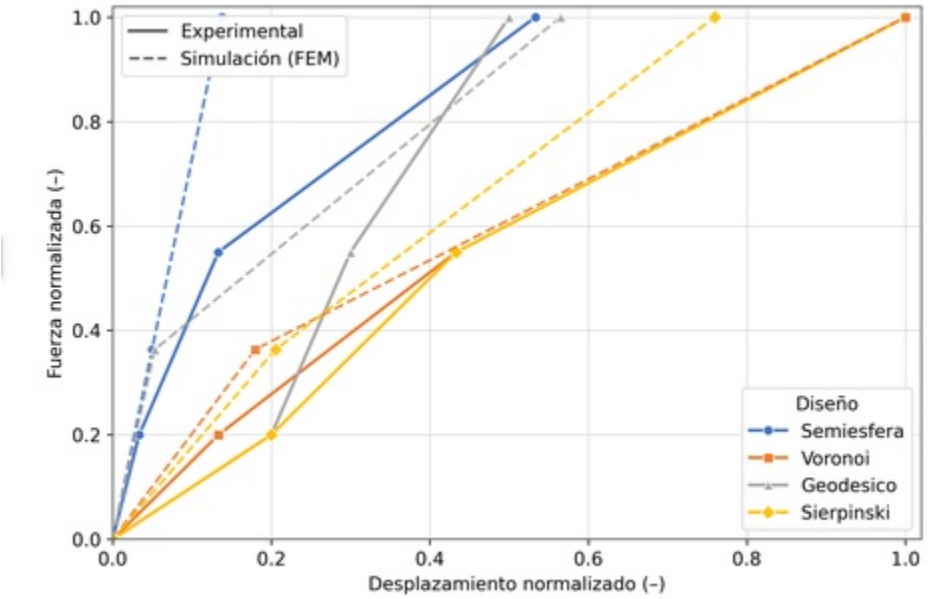


Figura 12. Comparativa entre resultados medidos y simulados de fuerza contra desplazamiento. Representación amplificada 2x. Elaboración propia.

Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que la geometría del objeto de estudio influye de manera decisiva en la relación entre masa, rigidez global, concentración de esfuerzos y desplazamiento. La comparación entre una semiesfera sólida y tres configuraciones reticuladas permitió establecer que la reducción de material no conduce automáticamente a una mejora estructural: mientras los domos reticulados disminuyeron la masa entre 54 % y 63 % respecto a la semiesfera de referencia, también presentaron mayores esfuerzos máximos de von Mises y, en algunos casos, incrementos significativos de desplazamiento.

Estos resultados indican que la eficiencia estructural de un domo reticulado no depende únicamente de perforar o aligerar la superficie, sino de la organización geométrica de sus elementos resistentes. Las topologías regulares y trianguladas tienden a distribuir mejor la carga y a conservar mayor rigidez global, mientras que las configuraciones irregulares o fractales evaluadas pueden favorecer la ligereza y la porosidad, pero requieren optimización adicional para reducir concentraciones locales de esfuerzo y deformaciones excesivas.

La comparación entre simulación y ensayo físico debe interpretarse como preliminar y principalmente cualitativa. Ambos enfoques coinciden en la tendencia general: las geometrías sólida y geodésica se comportaron como las más rígidas, mientras que Voronoi y Sierpinski mostraron mayor deformabilidad. No obstante, las diferencias entre el material idealizado del modelo numérico y el material realmente impreso por FDM, así como los efectos de anisotropía, contacto, alineación de carga y condiciones de frontera, impiden considerar esta etapa como una validación cuantitativa definitiva.

En conjunto, el estudio demuestra que la combinación de diseño geométrico, manufactura aditiva, simulación numérica y ensayo físico permite identificar rutas de aligeramiento estructural con criterios comparables. El resultado más sólido no es afirmar que una geometría sea universalmente superior, sino reconocer que, bajo las condiciones evaluadas, el domo geodésico representa la alternativa reticulada con mejor equilibrio entre reducción de masa y conservación de rigidez. La siguiente etapa deberá orientarse a repetir los ensayos, caracterizar mecánicamente el material impreso, controlar con mayor precisión las condiciones de carga y optimizar espesores, nodos y transiciones geométricas para transformar esta evidencia preliminar en una validación estructural más robusta.

Bibliografía

Ahn, S.-H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., & Wright, P. K. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*, *8*(4), 248–257. https://doi.org/10.1108/13552540210441166

Aizenberg, J., Weaver, J. C., Thanawala, M. S., Sundar, V. C., Morse, D. E., & Fratzl, P. (2005). Skeleton of *Euplectella* sp.: Structural hierarchy from the nanoscale to the macroscale. *Science*, *309*(5732), 275–278. https://doi.org/10.1126/science.1112255

Brown, K. A. R., Bacheva, D., & Trask, R. S. (2019). The structural efficiency of the sea sponge *Euplectella aspergillum* skeleton: Bio-inspiration for 3D printed architectures. *Journal of the Royal Society Interface*, *16*(156), Article 20180965. https://doi.org/10.1098/rsif.2018.0965

Falcucci, G., Amati, G., Fanelli, P., Krastev, V. K., Polverino, G., Porfiri, M., & Succi, S. (2021). Extreme flow simulations reveal skeletal adaptations of deep-sea sponges. *Nature*, *595*(7868), 537–541. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03658-1

Fayemi, P.-E., Wanieck, K., Zollfrank, C., Maranzana, N., & Aoussat, A. (2017). Biomimetics: Process, tools and practice. *Bioinspiration & Biomimetics*, *12*(1), Article 011002. https://doi.org/10.1088/1748-3190/12/1/011002

Fernandes, M. C., Aizenberg, J., Weaver, J. C., & Bertoldi, K. (2021). Mechanically robust lattices inspired by deep-sea glass sponges. *Nature Materials*, *20*, 237–241. https://doi.org/10.1038/s41563-020-0798-1

Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1997). *Cellular solids: Structure and properties* (2nd ed.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781139878326

International Organization for Standardization. (2011). *Mechanical testing of metals — Ductility testing — Compression test for porous and cellular metals* (ISO 13314:2011).

Meier, T., Litvinov, S., Li, R., Blankenship, B. W., Kokubun, A., Hahn, D., Mavrikos, S., Vangelatos, Z., Yildizdag, M. E., Makiharju, S. A., Zheng, X., Koumoutsakos, P., & Grigoropoulos, C. P. (2026). Optimized mechano-fluidic metamaterials inspired by deep-sea sponges. *Nature Communications*, *17*, Article 6062. https://doi.org/10.1038/s41467-026-72612-4

National Oceanic and Atmospheric Administration Okeanos Explorer Program. (2012). *Venus flower basket glass sponges (Euplectella aspergillum), Gulf of Mexico 2012 Expedition* [Photograph]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Expl2159_-_Flickr_-_NOAA_Photo_Library.jpg

Vincent, J. F. V., Bogatyreva, O. A., Bogatyrev, N. R., Bowyer, A., & Pahl, A. K. (2006). Biomimetics: Its practice and theory. *Journal of the Royal Society Interface*, *3*(9), 471–482. https://doi.org/10.1098/rsif.2006.0127