

Gridshells elásticas: desarrollo del plano al espacio



ETSAM UPM

Autor: Álvaro Martín Ruiz
Tutora: Eugenia Rosado María

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA



TRABAJO FIN DE GRADO

Álvaro Martín Ruiz

Gridshells elásticas: desarrollo del plano al espacio

Trabajo de fin de grado TFG
Coordinador: Javier Gómez Pioz
Tutora: Eugenia Rosado María
Aula 7

Álvaro Martín Ruiz
Dpto Matemática Aplicada

Enero 2024
Semestre de otoño 2024

ETSAM
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de
Madrid Universidad Politécnica de Madrid
Av. Juan de Herrera 4 20040, Madrid

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN

- 1.1. Motivación
- 1.2. Objetivos y estructura del trabajo

2. FUNDAMENTOS CONTEXTUALES

- 2.1. *Gridshells*
- 2.2. Geodésicas. Curvatura Geodésica
- 2.3. Clasificación de las superficies según el tipo de curvatura
- 2.4. *Gridshells* geodésicas elásticas
- 2.5. Contexto histórico
- 2.6. Aplicaciones contemporáneas
- 2.7. Justificación

3. ESTRUCTURAS PARAMÉTRICAS DE FORMA LIBRE

- 3.1. Definición
- 3.2. Elementos que componen una superficie *free-form* en el contexto de las *gridshells* elásticas
- 3.3. Materialización de las superficies *free-form* a partir de sus componentes

4. DISEÑO COMPUTACIONAL DE SUPERFICIES GRIDSHELL DE FORMA LIBRE

- 4.1. Puntos de partida
- 4.2. Método directo: de malla plana a *gridshell*
 - 4.2.1. Generación de mallas planas
 - 4.2.2. Prototipado e impresión 3d
 - 4.2.3. Simulación del mecanismo de despliegue
- 4.3. Método inverso: de superficie *free-form* a malla plana

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

PROCEDENCIA DE LAS IMÁGENES

BIBLIOGRAFÍA

AGRADECIMIENTOS

Estudiar la carrera de arquitectura me ha hecho entender que el conocimiento no se divide en compartimentos estancos, sino que todos sus aspectos están interrelacionados. La labor del arquitecto consiste en conocer y comprender estas conexiones, acercándose a ellos con la seguridad del buen profesional, y a su vez con la pasión y humildad de quien desea seguir aprendiendo día a día. Este trabajo es el resultado de mi interés en campos muy diversos, los cuales he ido explorando a lo largo de mi formación en la ETSAM y de los que nunca dejaré de disfrutar aprendiendo.

Gracias a mi tutora, Eugenia, por todos sus consejos, paciencia y comprensión durante el transcurso del trabajo, de verdad que no lo podría haber hecho sin su gran apoyo y ayuda semana a semana. A todos los profesores de la escuela, en especial a Antonio Lara, por introducirme con su pasión a este tema. A mis compañeros de la escuela, los que estuvieron desde el primer día hasta el último, en especial a Sergio, por animarme y haber estado ahí en los momentos más complicados. A mis padres, por haberme permitido estudiar la carrera de mis sueños y por su cariño e incondicionalidad.

Gracias a mi hermano, Dani, por ser mi referente e inspiración en la vida. Estoy seguro de que estarías muy orgulloso de lo que estamos consiguiendo.

RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo abordar las posibilidades geométricas y arquitectónicas que tienen las *gridshells* elásticas, una subfamilia de las *gridshells* cuya particularidad es su despliegue, partiendo de una malla completamente plana, y con la capacidad de adoptar geometrías tridimensionales únicas, gracias a su elasticidad y diseño estratégico. El trabajo explora su diseño y construcción, integrando teoría geométrica con métodos computacionales y maquetas físicas.

Combinando herramientas de diseño paramétrico, como el plug-in de Rhino 7, Grasshopper, con procesos experimentales mediante impresión 3D, se presentan dos métodos de construcción de las *gridshells* elásticas desde dos aproximaciones completamente opuestas: un método directo, que estudia la generación directa de mallas planas compatibles en función de principios estructurales básicos, y un camino inverso, que busca aproximar superficies de forma libre desde una malla plana. Aunque el enfoque principal ha sido el desarrollo del método directo, se presenta una propuesta teórica del método inverso como línea futura de investigación.

Este TFG es, durante todo su desarrollo, consciente de las limitaciones impuestas por los recursos disponibles, tanto a nivel computacional como físico, y, a pesar de ello, los experimentos realizados permiten validar el comportamiento estructural y geométrico de las *gridshells*, destacando su potencial para aplicaciones arquitectónicas contemporáneas. En particular, destaca su impresionante capacidad para generar estructuras ligeras, sostenibles y eficientes, que combinan funcionalidad con estética, convirtiéndose así en una posible solución innovadora para la arquitectura del siglo XXI.

Palabras clave: Superficies *free-form*, *gridshell*, diseño paramétrico, optimización, impresión 3d, *gridshell* elástica.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

Durante la primavera de 2024, tuve la oportunidad de cursar la asignatura de “Diseño y fabricación digital de estructuras de madera”, con los profesores del departamento de ETSAMadera (1.1), como parte de la asignatura de Taller Experimental II. En él, pude encontrar mi pasión por el campo del diseño paramétrico, esencial para el desarrollo de este trabajo, descubriendo las múltiples posibilidades que ofrece este enfoque para integrar geometría, cálculo y construcción en las nuevas soluciones arquitectónicas del siglo XXI.

Este curso también me permitió acercarme al campo de las *gridshells*, una maravillosa solución arquitectónica que combina algunas de las áreas de la arquitectura que más me interesan: matemáticas, geometría, diseño, construcción y cálculo de estructuras. Esto me llevó a considerar estudiarlas más en profundidad para mi TFG. En ese proceso, me llamó especialmente la atención su potencial para optimizar materiales, minimizar el impacto ambiental y adaptarse a contextos arquitectónicos variados, cualidades que considero esenciales para afrontar los retos de la arquitectura contemporánea. Tras un tiempo de consideración, me topé con las *gridshells* elásticas, una subfamilia dentro de las *gridshells*, que tiene mucho menos estudio detrás y al que le vaticino un grandísimo potencial desde el primer momento en el que las empecé a estudiar.

1.2. Objetivos y estructura del trabajo

El diseño de las *gridshells*, y concretamente de las *gridshells* elásticas, requiere de potentes herramientas de cálculo geométrico. Este proceso de diseño está vinculado a métodos de optimización y a programas de diseño paramétrico. Gracias a estas herramientas, se puede abordar tanto el comportamiento estructural como las limitaciones geométricas propias de estas estructuras, facilitando su desarrollo desde la teoría hasta la práctica.

El objetivo de mi trabajo es comprender la geometría tan particular de las *gridshells* elásticas y elaborar métodos que faciliten su diseño y construcción. El trabajo se estructura en dos partes: en la primera, se introducen las *gridshells*, explicando su contexto histórico y características matemáticas y geométricas, abarcando desde los principios básicos de la geometría diferencial hasta las aplicaciones contemporáneas más destacadas. Tras ello, en la segunda parte, se presenta una introducción a los procesos empleados para la generación de *gridshells* elásticas a partir de dos acercamientos opuestos, desarrollando posteriormente maquetas físicas a escala hechas con impresión 3D. Estas maquetas no solo validan las simulaciones realizadas, sino que también evidencian las posibilidades y limitaciones de los materiales empleados, permitiendo reflexionar sobre su viabilidad en proyectos a mayor escala.

Pese a estar todas las fuentes citadas en la bibliografía final, los trabajos que más han ayudado a formarme de cara a la preparación de este TFG son los siguientes:

- Baek, C., Sageman-Furnas, A. O., Jawed, M. K., & Reis, P. M. (n.d.). ***Form finding in elastic gridshells. Proceedings of the National Academy of Sciences.*** Massachusetts Institute of Technology, University of Goettingen, and Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Pillwein, S., & Musialski, P. (2021). ***Generalized deployable elastic geodesic grids. ACM Transactions on Graphics, 40(6), Article 271, 1–15.*** <https://doi.org/10.1145/3478513.3480516>
- Soriano, E., Sastre, R. & Boixader, D. (2019). ***G-shells: flat collapsible geodesic mechanisms for gridshells.*** ETS d'Arquitectura del Vallès BarcelonaTech

En ellos se trata buscar solución, mediante distintos caminos, matemáticos y geométricos, al reto de las *gridshells* elásticas, cada uno desde un punto de vista diferente.



IMAGEN 1.1. Maqueta realizada durante el Taller Experimental II junto a ETSAMadera.

2. FUNDAMENTOS CONTEXTUALES

2.1. Gridshells

Una *gridshell* es una red flexible que, mediante fuerzas internas o externas, adoptan formas tridimensionales óptimas para soportar cargas con el mínimo material y la máxima eficiencia. La construcción de formas curvas con tablonés de madera se lleva aplicando en arquitectura durante más de un siglo. A partir de un estado recto, un tablón de madera, sometido a una fuerza de tracción, debe doblarse fuera de su plano, pero no puede estirarse ni contraerse. La fibra neutra¹ del tablón tiene una curvatura geodésica nula en cualquier superficie a la que sea tangente, pudiendo asemejar la trayectoria de la fibra neutra del tablón a una curva geodésica de dicha superficie (2.1).

2.2. Geodésicas. Curvatura geodésica

Las geodésicas² son un concepto fundamental en geometría diferencial: describen la trayectoria más corta entre dos puntos de una superficie. Históricamente, los antiguos griegos ya intuían que la línea más corta entre dos puntos en el plano era una línea recta. Sin embargo, con el desarrollo de la geometría diferencial del siglo XIX, particularmente gracias a trabajos como los de Carl Friedrich Gauss y Bernhard Riemann, surge el análisis formal de las geodésicas. Fue Gauss quien introdujo el concepto de curvatura intrínseca y estudió las propiedades de una superficie sin referencia a su entorno tridimensional, mientras que Riemann generalizó los conceptos de Gauss a espacios de mayores dimensiones, ayudando a sentar las bases de la geometría moderna. Matemáticamente, una geodésica es una curva que minimiza la distancia entre dos puntos en una superficie. En términos de cálculo variacional, esto se formaliza

¹ “La fibra neutra o <<eje neutro>>, es la superficie material curva, de una pieza alargada o de una placa, deformada por flexión, que separa la zona comprimida de la zona traccionada.” Fuente “Fibra Neutra”, *Wikipedia*, última modificación el 31 de agosto de 2019, https://es.wikipedia.org/wiki/Fibra_neutra

² “En geometría, la línea geodésica se define como la línea de mínima longitud que une dos puntos en una superficie dada, y está contenida en esta superficie”. Fuente “línea geodésica”, *Wikipedia*, última modificación el 21 de octubre de 2024, https://es.wikipedia.org/wiki/Línea_geodésica



IMAGEN 2.1. Geodésicas de una superficie

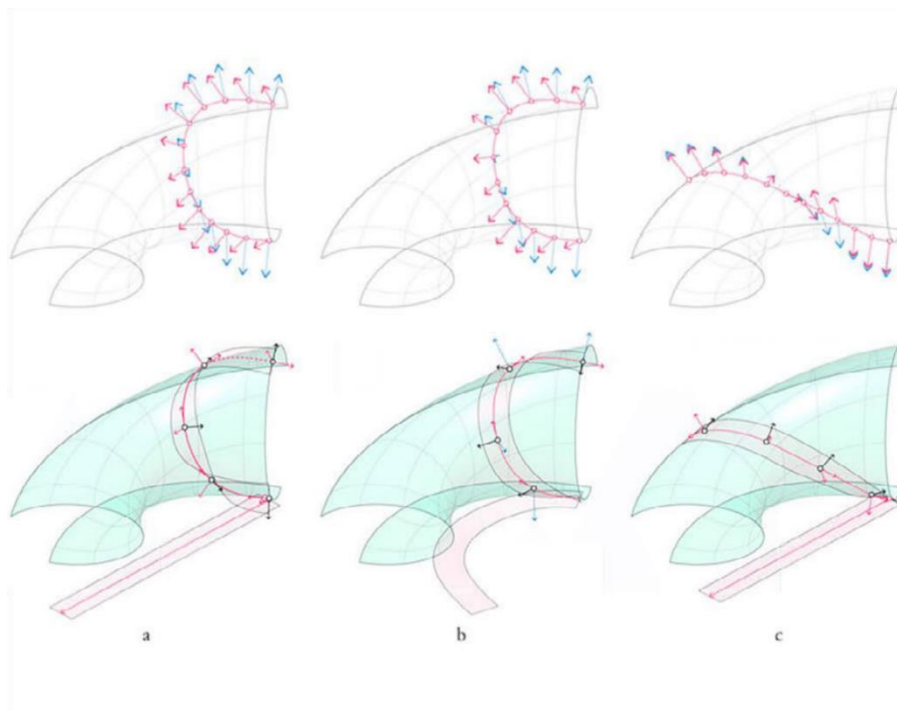


IMAGEN 2.2. Torsión de las curvas de una superficie
(Enrique Soriano)

mediante la resolución de la ecuación de Euler-Lagrange, aplicada a la función que mide la longitud de la curva. Intuitivamente, en una superficie plana las geodésicas son líneas rectas, mientras que, en superficies curvas, como una esfera, son trayectorias intrínsecas como los arcos de los círculos máximos.

Desde un punto de vista práctico, las geodésicas tienen aplicaciones en diversas áreas. En la arquitectura, son esenciales para diseñar estructuras como *gridshells*, donde el uso de estas curvas minimiza materiales y optimiza la resistencia. En navegación y geodesia, se emplean para trazar rutas óptimas en la superficie terrestre, como ocurre en los vuelos intercontinentales que siguen geodésicas aproximadas a grandes círculos. Además, en gráficos por ordenador, el cálculo de geodésicas es clave para modelar superficies curvas y simular deformaciones naturales (2.2). Este concepto también es crucial en el diseño paramétrico, donde las geodésicas permiten generar formas eficientes y estéticamente agradables que responden a principios estructurales y matemáticos intrínsecos.

2.3. Clasificación de las superficies según el tipo de curvatura

Según el tipo de curvatura de una superficie, las podemos clasificar en:

Superficies planas:

Su curvatura es nula en todas las direcciones ($k_1 = k_2 = 0$). Lo que comúnmente conocemos como un plano.

Superficies regladas:

Es un tipo de superficie geométrica que se genera al trasladar una línea recta (generatriz) a lo largo de una o varias curvas directrices, como por ejemplo los paraboloides hiperbólicos y los hiperboloides.

Superficies de curvatura simple o desarrollables:

Son aquellas que presentan curvatura en una dirección y son planas en la otra dirección, como por ejemplo los cilindros o los conos ($k_1 = 0, k_2 \neq 0$)

Superficies de doble curvatura.

Presentan curvatura en ambas direcciones ($k_1 \neq 0, k_2 \neq 0$), y son las que trataremos de aproximar gracias a las gridshells elásticas. Según la relación entre sus curvas principales en cada punto de la superficie, se clasifican en sinclásticas y anticlásticas.

- Superficies de doble curvatura sinclásticas:

Por definición, son aquellas cuyas curvaturas principales (k_1 y k_2) tienen el mismo signo, es decir, ambas son positivas o ambas son negativas. Por ello es que son cóncavas o convexas en todos sus puntos. Las superficies sinclásticas son más estables y ofrecen una distribución más uniforme de las cargas. En arquitectura las solemos ver en cúpulas y bóvedas.

- Superficies de doble curvatura anticlásticas:

A diferencia de las superficies sinclásticas, las anticlásticas son aquellas en las que sus curvaturas principales en cualquier punto tienen signos opuestos, es decir, una positiva y otra negativa ($k_1 > 0$ y $k_2 < 0$). Son más ligeras, y, en ocasiones, más estéticas que las sinclásticas, pero sin embargo ofrecen una menor estabilidad y suelen requerir de apoyos adicionales.

2.4. *Gridshells* geodésicas elásticas

Las *gridshells* elásticas son estructuras ligeras desarrollables que utilizan este principio para aproximar la geometría de una superficie de forma libre o superficie NURBS³. En un estado inicial, la malla se dispone de forma completamente plana, adquiriendo la curvatura a medida que se desarrolla la estructura. Finalmente, la *gridshell* desplegada se fija a un soporte mantiene su forma final.

Como estructuras por flexión activa, las *gridshells* que se deforman elásticamente, hechas a partir de elementos inicialmente planos y rectos, se benefician del efecto de rigidización por preesfuerzo y podrían, potencialmente, presentar un comportamiento cinético. Sin embargo, estas *gridshells* se construyen tradicionalmente mediante la colocación individual de los tablones. Aquí, presentamos un mecanismo cuya ventaja es la de crear superficies personalizadas, desde un estado inicial plano, empleando una expansión cinética. Se trata de un mecanismo híbrido y flexible que basa la transformación de la estructura en una combinación de la rotación libre de los elementos en las bisagras y la deformación elástica de los listones.



IMAGEN 2.3. *Gridshell* del Vyksa Steel Production Hall (Vladimir Shukhov)

³ Ver apartado 3.1

2.5. Contexto histórico

Las *gridshells*, estructuras caracterizadas por su forma curva y la distribución eficiente del material, tienen sus raíces en los avances tecnológicos de finales del siglo XIX, un periodo marcado por la revolución industrial y la introducción del acero como material de construcción. Sin embargo, el concepto de las *gridshells*, ya se había utilizado intuitivamente durante siglos en la construcción de cascos y estructuras laminares de madera, adaptándose a las limitaciones geométricas de este material. El ingeniero ruso Vladimir Shukhov fue pionero en la formalización y construcción de *gridshells* modernas, desarrollando la primera conocida en 1897. Con las herramientas de cálculo de su época, Shukhov combinó su profundo conocimiento teórico con la experimentación práctica. Diseñó teorías específicas sobre tensiones y deformaciones aplicadas a vigas, láminas y membranas, logrando avances fundamentales en la ingeniería estructural. Uno de sus primeros hitos fue la Shukhov Rotunda, una estructura hiperbólica de acero presentada en la Exposición de



IMAGEN 2.4. Polydome EPFL (Julius Natterer)

Toda Rusia de 1896, que cubría un espacio central amplio y estableció precedentes para el diseño de *gridshells* y estructuras espaciales. Un año más tarde, diseñó una sala de producción para una empresa siderúrgica en Vyksa (1.1), considerada la primera *gridshell* de la historia, gracias a su entramado curvo y tridimensional.

En el último siglo, se han encontrado aplicaciones cada vez más diversas de las redes geodésicas, desde fuselajes hasta estructuras laminares civiles, optimizando la construcción mediante diseños eficientes. Un ejemplo destacado son las cáscaras nervadas del ingeniero alemán Julius Natterer (1.2), basadas en la geometría de capas de tablonos, que marcó un hito en la aplicación de redes de madera en la construcción. Con el avance de los métodos computacionales, estas técnicas han evolucionado, permitiendo la creación de redes geodésicas conectadas simplemente mediante pernos, lo que facilita la construcción eficiente de cáscaras y chasis industriales personalizados.

Décadas después de los trabajos de Shukhov, el arquitecto alemán Frei Otto revolucionaría el diseño de las *gridshells* desde una perspectiva experimental y tecnológica. En 1958 fundó el Institut für leichtbau Flächentragwerke (Instituto para las estructuras superficiales ligeras), donde se dedicó a estudiar estructuras ligeras mediante el uso de modelos físicos a gran escala y enfoques experimentales. Este método, conocido como *form-finding*, es un mecanismo en el que la geometría final de la arquitectura se determina a través de procesos inspirados en la naturaleza. Así, Frei Otto se inspiró en las maquetas colgantes invertidas de Antoni Gaudí para desarrollar formas que combinan la optimización estructural con la reducción de costes y material.

Los avances en el cálculo estructural y los materiales laminados culminaron en obras como el Multihall de Mannheim (1975), diseñado por Frei Otto y Ewald Bubner. Este edificio, construido con una *gridshell* de madera laminada, ejemplifica la

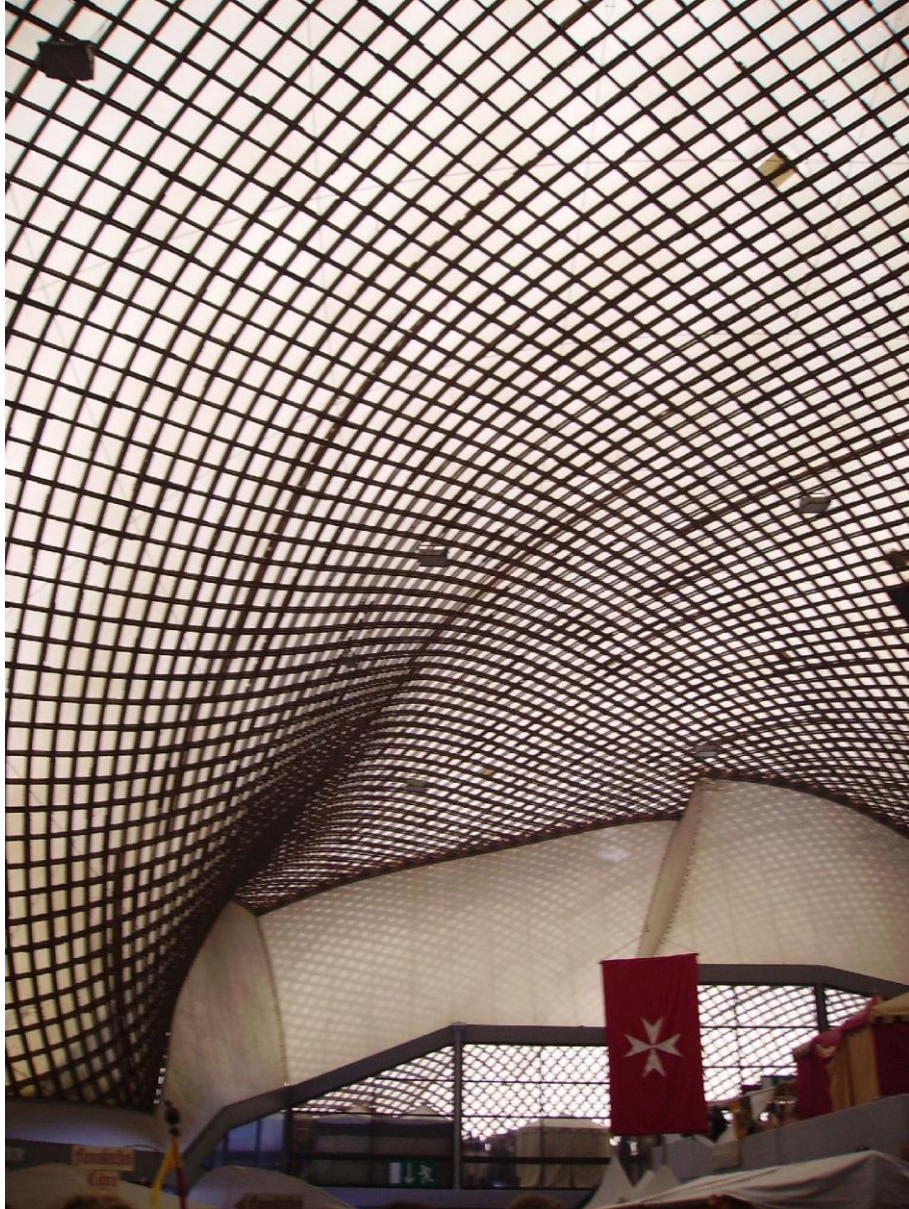


IMAGEN 2.5. *Gridshell* del Manheim Multihalle (Frei Otto)

capacidad de estas estructuras de cubrir grandes espacios minimizando recursos e integrando eficiencia, ligereza y elegancia en un diseño arquitectónico. Además, los métodos contemporáneos para la generación de las *gridshells* han ampliado el alcance de estas estructuras, demostrando su potencial en campos que van desde la arquitectura hasta la industria.

2.6. Aplicaciones contemporáneas

El futuro de las *gridshells* está ligado a avances en tecnología, diseño digital y materiales sostenibles, ampliando su aplicación en diversos campos. Estas estructuras, históricamente valoradas por su eficiencia y elegancia, se perfilan como soluciones clave para los retos arquitectónicos del siglo XXI.

Nuevas herramientas computacionales y algoritmos generativos están permitiendo diseños computacionales más complejos y adaptados a contextos específicos. Tecnologías como la impresión 3D y el ensamblaje robótico han revolucionado las posibilidades en las que podemos imaginar la construcción de nuevas *gridshells*, haciendo posible encontrar formas novedosas más eficientes e innovadoras.

La exploración de nuevos materiales también impulsa su desarrollo. Fibras de carbono, biopolímeros y maderas avanzadas las hacen más ligeras y sostenibles.

Las *gridshells* destacan por su versatilidad en aplicaciones contemporáneas, adaptándose a las necesidades de un mundo en constante transformación. En entornos urbanos, estas estructuras pueden convertirse en soluciones clave para espacios multifuncionales. Por ello, representan mucho más que una solución estructural; son un campo de oportunidades que abarca desde avances en materiales y tecnologías hasta aplicaciones visionarias que reinventan el diseño arquitectónico en su totalidad.



IMAGEN 2.6. *Kings Cross Station* (John McAslan + Partners)



IMAGEN 2.7. *Centre Pompidou Metz* (Shigeru Ban)

2.7. Justificación

Las *gridshells* se convierten en una solución arquitectónica y estructural que brilla por su gran capacidad de combinar ligereza, resistencia y eficiencia. A continuación, destacaré algunas de las principales virtudes que justifican el uso de estas estructuras:

Reducción de costes:

La optimización del material y la capacidad de cubrir grandes espacios con elementos mínimos hacen de las *gridshells* una opción económica. Su eficiente diseño minimiza los residuos durante su construcción y reducen los costes asociados al transporte y montaje.

Facilidad de montaje, transporte y despliegue:

La naturaleza de los elementos de las *gridshells* facilita su fabricación y montaje. Estas estructuras se diseñan como sistemas desmontables o plegables, facilitando el transporte a grandes distancias y su despliegue en cualquier lugar.

Resistencia a Cargas Considerables

La naturaleza pretensada de las *gridshells* distribuye las fuerzas de manera uniforme, permitiendo maximizar las cargas que son capaces de soportar, minimizando el gasto material (4.8).

Versatilidad en diseño y aplicación

El uso de *gridshells* en la construcción del siglo XXI ofrece una gran versatilidad de aplicaciones arquitectónicas, permitiendo explorar nuevas formas que se adaptan a diferentes espacios, combinando estética y funcionalidad.

Valor ambiental y sostenibilidad

La optimización del material es un factor clave en la arquitectura contemporánea a nivel económico y ambiental. Al utilizar menos recursos y ser compatibles con materiales renovables, estas estructuras son ideales para proyectos que priorizan la sostenibilidad. Además, su naturaleza facilita la integración de

tecnologías pasivas, como ventilación cruzada y aprovechamiento de luz natural.

Innovación y expresión arquitectónica

Además de sus ventajas técnicas, las *gridshells* también ofrecen todo un lienzo para la creatividad en la arquitectura. Su capacidad para generar formas fluidas y orgánicas permite diseñar estructuras únicas resuelven problemas técnicos a la vez que también inspiran y transforman el entorno construido.

3. ESTRUCTURAS PARAMÉTRICAS DE FORMA LIBRE

3.1. Definición

Las estructuras de forma libre son geometrías caracterizadas por estar definidas a partir de superficies NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines), que son una generalización de las curvas de Bézier⁴ o B-Splines y otros métodos de interpolación matemática avanzada. A diferencia de superficies generadas por expresiones matemáticas tradicionales, como las parábolas en las bóvedas o las esferas en cúpulas circulares, las formas libres permiten una mayor complejidad geométrica y flexibilidad en el diseño.

3.2. Elementos que componen una superficie *free-form* en el contexto de las *gridshells* elásticas

Superficie: superficie NURBS de forma libre a aproximar.

Elementos continuos: formadas a partir de la familia de líneas geodésicas que recorren la superficie desde un punto de su perímetro a otro.

Paneles: tras la división de la superficie a partir de sus geodésicas, se generan paneles cuadrangulares entre ellas. Serán los “huecos” de la *gridshell*.

Nudos o vértices: se dan en las intersecciones entre dos geodésicas o entre una geodésica y el elemento borde de la superficie. Deben ser articulaciones rotativas⁵ para permitir el despliegue de la estructura. Se ejecutan mediante pernos que unen los elementos permitiendo su libre rotación. Para la elaboración de las maquetas de este trabajo, se utiliza un simple mecanismo de tornillo-tuerca (4.9).

⁴ Para definir una curva de Bézier partimos de $n + 1$ puntos B_0, \dots, B_n planos (en R^2) o espaciales (en R^3) que llamaremos vértices o puntos de control “*Formas libres I: Curvas Nurbs*” por Sonia Luisa Rueda (2015)

⁵ Ver imagen 4.10.

Relación entre los componentes

Estos elementos interactúan como un sistema integrado:

- La superficie define la geometría global y la base del diseño.
- Los paneles subdividen la superficie para facilitar su construcción, mientras que los elementos continuos distribuyen las cargas estructurales.
- Los nudos o vértices conectan estos componentes, garantizando la estabilidad y continuidad del sistema.

3.3. Materialización de superficies *free-form* a partir de sus componentes

La materialización de superficies *free-form* ha dado lugar a soluciones innovadoras que adaptan las formas complejas al ámbito físico mediante diferentes enfoques constructivos. En función de los elementos previamente explicados que se tomen para descomponer una superficie de forma libre, podemos identificar tres estrategias principales:

Superficies continuas: “tela estructural”

Este enfoque se basa en el uso de membranas o materiales continuos que cubren grandes superficies de forma orgánica. Estas "telas" suelen estar sometidas a tensiones controladas para adoptar una geometría estable.

Un buen ejemplo de estas superficies es el *Ark Nova*, del arquitecto japonés Arata Isozaki (3.1). Se trata de estructura inflable que combina la elasticidad y flexibilidad de la membrana para formar un espacio continuo.

Superficies panelizadas

Cambiando el enfoque, podemos dividir la superficie en paneles discretos, que pueden ser cuadrangulares, triangulares o de geometrías más complejas, dependiendo de la topología de la superficie y las restricciones estructurales, y unirlos mediante elementos que normalmente son segmentos individuales de



IMAGEN 3.1. Pabellón Ark Nova (Arata Isozaki)

acero y otros materiales. La cubierta del Zoo de Berlín (3.2), del arquitecto alemán Frei Otto, ejemplifica la utilización de paneles triangulares para la materialización de una superficie *free-form*.

Superficie a partir de elementos continuos

En este caso, la superficie se materializa mediante elementos lineales o barras que trabajan conjuntamente para aproximar la geometría de la superficie. Ya podemos considerar a esta configuración como una *gridshell*, que, si se tratara de una *gridshell* elásticas, sus elementos se deformarían de manera controlada desde una configuración inicial plana.



IMAGEN 3.2. Cubierta del Zoo de Berlín (Frei Otto)

4. DISEÑO COMPUTACIONAL DE SUPERFICIES GRIDSHELL DE FORMA LIBRE

Para que los diseños de las *gridshells* que vamos a estudiar en este TFG garanticen el correcto funcionamiento de la estructura final y que pueda acercarse lo máximo posible a la superficie final objetivo, resulta necesario realizar una serie de aclaraciones y restringir ciertos parámetros de trabajo. Es importante considerar que las superficies complejas, especialmente aquellas con bordes cóncavos, pueden presentar desafíos adicionales en su representación como *gridshells*, y que, por tanto, no las vamos a estudiar en este trabajo, pero resultarían un reto absolutamente interesante y probablemente debieran ser resueltas teniendo otras consideraciones en cuenta.

Uno de los requisitos fundamentales es que la configuración inicial de la malla sea completamente plana. Este aspecto resulta crucial para garantizar un despliegue eficiente y funcional: en primer lugar, garantiza que la fabricación y ensamblaje de los elementos de la malla sean más simples y económicos, ya que los materiales planos (como paneles de madera, acrílicos o láminas de PLA) son más fáciles de producir, almacenar y transportar. Este estado planar inicial también simplifica procesos como el corte y el ensamblaje, reduciendo posibles errores y optimizando los recursos.

Además, desde una perspectiva estructural, el despliegue de una malla plana permite controlar con mayor precisión la deformación y el comportamiento de los elementos durante la transición al espacio tridimensional. Esto se debe a que cualquier irregularidad o curvatura inicial podría generar tensiones internas no deseadas, comprometiendo la estabilidad y la capacidad de carga de la *gridshell* final.

En este contexto, los modelos físicos desempeñan un papel esencial, tanto para validar el comportamiento teórico de las mallas como para explorar las posibilidades y limitaciones de los materiales empleados.

En cuanto a las características de los distintos elementos, a efectos de este TFG voy a trabajar con láminas de plástico PLA de color negro, fabricadas mediante impresión 3D, cuya sección de listón trata de ser lo más bidimensional posible, con una proporción aproximada de 1:10 mm, que las otorga la suficiente elasticidad para alcanzar el grado de curvatura al que van a ser sometidas sin alcanzar su límite elástico y que así, una vez exentas de la tensión de deformación, puedan retornar a su estado inicial. Para el análisis, se asume que la línea central de cada lámina actúa como la geodésica de la superficie, aunque no todas las geodésicas de una superficie pueden trasladarse directamente a una *gridshell*.

A su vez, también cabe destacar que, para simplificar el desarrollo del trabajo y de los distintos modelos que realizaré, no he tenido en consideración factores como la gravedad, la fricción o los diferentes puntos de rotura de los materiales. Estos aspectos, aunque fundamentales en un análisis realista, se han omitido intencionadamente para centrarme en el comportamiento geométrico y estructural básico de la *gridshell*. La gravedad, por ejemplo, podría generar deformaciones adicionales en los elementos al desplegarse, mientras que la fricción en las uniones puede limitar la capacidad de rotación de los nudos, alterando la flexión global de la estructura. Por otro lado, los puntos de rotura del material podrían determinar los límites de carga y deformación admisibles, pero requieren un análisis más detallado de las propiedades mecánicas de los materiales que exceden del alcance de este trabajo.

4.1 Simplificación del desarrollo

El primer punto de partida para empezar a trabajar es el de comprender como funciona el despliegue de una malla plana desde su naturaleza más simple. Un cuadrilátero al que se le anexa una barra intermedia que no es paralela a dos de sus lados, conforma la configuración más elemental en el que podemos observar una *gridshell* elástica (4.1). Al deformar la estructura del borde, gracias a los nudos que permiten rotación, se produce

una variación global en todos los ángulos de la geometría, provocando una tracción o flexión en la barra intermedia, y, por tanto, generando el despliegue de la estructura al completo, habilitada por la capacidad de las barras de deformarse fuera de su plano, siempre manteniendo su longitud. En función de su disposición, el pandeo de los elementos aproxima una superficie virtual, que será de doble curvatura, ya sea sinclástica o anticlástica, y cuyo grado de curvatura no es linealmente proporcional al ángulo de deformación e incluso puede cambiar de signo una o varias veces durante el despliegue.

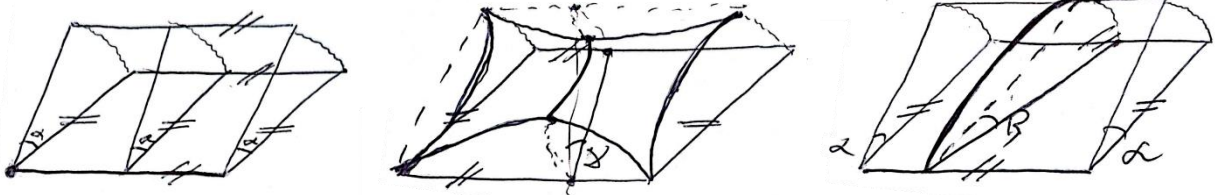


IMAGEN 4.1. Esquema pensamiento de despliegue

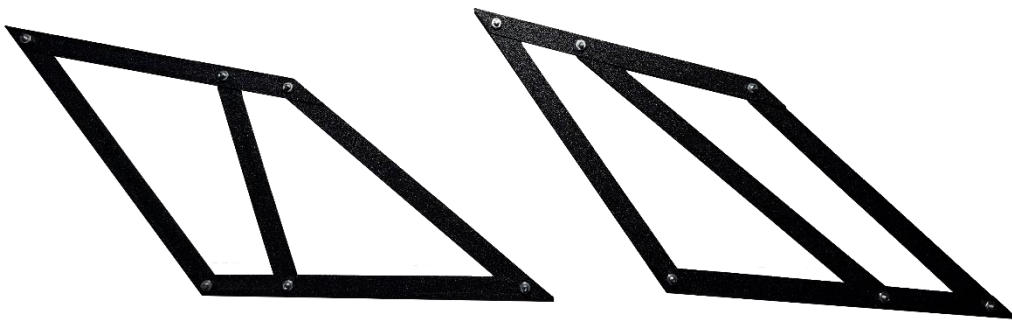


IMAGEN 4.2. Maquetas base (estado plano)

Si el elemento intermedio es más corto que los dos de sus lados, este trabajará a tracción, forzando la estructura a una disposición de doble curvatura anticlástica. Si, por el contrario, este es más largo, se comportará a compresión y se curvará en su plano, aproximando una superficie de doble curvatura sinclástica.



IMAGEN 4.3. Maquetas base desplegadas

4.2 Método directo: de malla plana a *gridshell*

A la hora de pensar en *gridshells* más sofisticadas, se abren dos caminos distintos en los que podemos trabajar y obtener resultados igualmente interesantes, cada uno con sus ventajas e inconvenientes. Un primer camino, en el que encontramos un método para generar geometrías de mallas planas que son funcionales y su comportamiento a la hora de desplegarse es estructuralmente correcto. La generación de estas geometrías pensadas directamente desde el plano las hace más sencillas y optimiza varios de los procesos de fabricación y montaje, pero hace que la geometría final de la superficie que aproxima sea difícil de predecir por medios computacionales, haciendo que el acercamiento deba ser más experimental, a través de la observación y montaje de distintas las maquetas físicas.

Asimismo, podemos pensar que se puede revertir el proceso, un segundo camino, al que llamaremos “método inverso”. En él, podemos tratar de, a partir de una superficie NURBS de forma libre dada, tratar de hallar la malla o mallas planas que la aproximan con el menor grado de error posible. Este método permitiría crear *gridshells* más precisas que se adapten con gran exactitud al espacio para el que han sido pensadas. En contrapartida, esto las hace computacionalmente más sofisticadas y difíciles de obtener a partir de los medios que tengo acceso y con los que voy a trabajar en este TFG, como el plug-in de Rhino “Grasshopper”. Por ello, propondremos los pasos que deberíamos seguir para poder llevar a cabo este camino inverso, pero me centraré en el desarrollo directo de las *gridshells*.

Explicado el comportamiento geométrico elemental, podemos aventurarnos a estudiar el despliegue de geometrías más sofisticadas. Este proceso se divide en dos fases principales: la generación de la malla plana y la simulación de su comportamiento en tres dimensiones.

4.2.1. Generación de mallas planas

El método utilizado para la generación de las diversas mallas planas, cuyas geometrías son validas para la construcción de *gridshells* elásticas, es una adaptación para *Grasshopper* de otros modelos de generación preexistentes, y permite controlar la distribución de los elementos de la malla:

a. Definición de curvas base:

El proceso de la generación de las distintas mallas comienza trazando una o varias curvas principales. Estas curvas, que pueden adoptar varias formas geométricas, y que en mi caso serán mayoritariamente catenarias, actúan como directrices primarias que definen la disposición inicial de una fila de intersecciones en la malla. Estas curvas iniciales funcionan como guías para la generación de la red de líneas que conforman la malla, mediante dos métodos diferenciados:

Métodos de disposición de los elementos de la malla

- Familias de curvas tangentes:

Las curvas generadas se dividen en una cantidad n de puntos, a partir de los cuales surge una familia de rectas que son tangentes a las curvas envolventes auxiliares. Serán estas rectas tangentes las que generarán la disposición principal de la malla

- Simetría y desplazamiento

La curva principal, dividida también en una cantidad n de puntos, se refleja. La segunda familia de puntos se desplaza a través de un *Shift List*. La conexión de ambas familias genera la nueva disposición de los elementos de la malla, garantizando una distribución controlada y uniforme de las líneas. (ver 4.4)

b. Rotación y traslación de líneas:

Una vez generadas las líneas de la malla, estas pueden someterse a transformaciones geométricas como rotaciones o traslaciones, adaptándose a las necesidades específicas del diseño.

Es importante destacar que, pese a que podemos tratar de elaborar un mecanismo de simulación del despliegue, las técnicas de generación explicadas no ofrecen una predicción precisa de la forma tridimensional final. Sin embargo, se observa que la mayoría de estas mallas tienden a generar corrugaciones internas y una combinación de curvaturas al desplegarse. Este comportamiento, lejos de ser un problema, puede resultar beneficioso para ciertos diseños de *gridshells* al proporcionar mayor estabilidad estructural. Asimismo, el uso de funciones suaves en las transformaciones tiende a producir curvaturas más regulares.

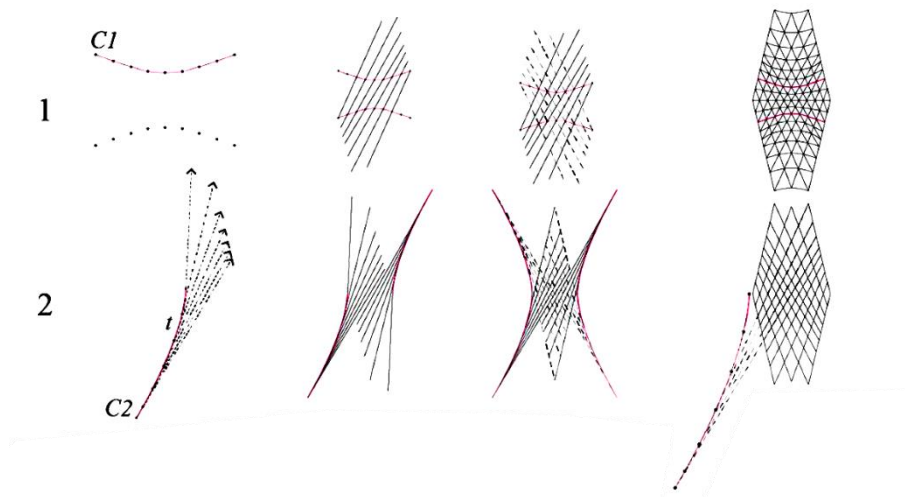


IMAGEN 4.4. Desarrollo de la disposición de los elementos de la malla (Enrique Soriano)

4.2.2. Prototipado e impresión 3d.

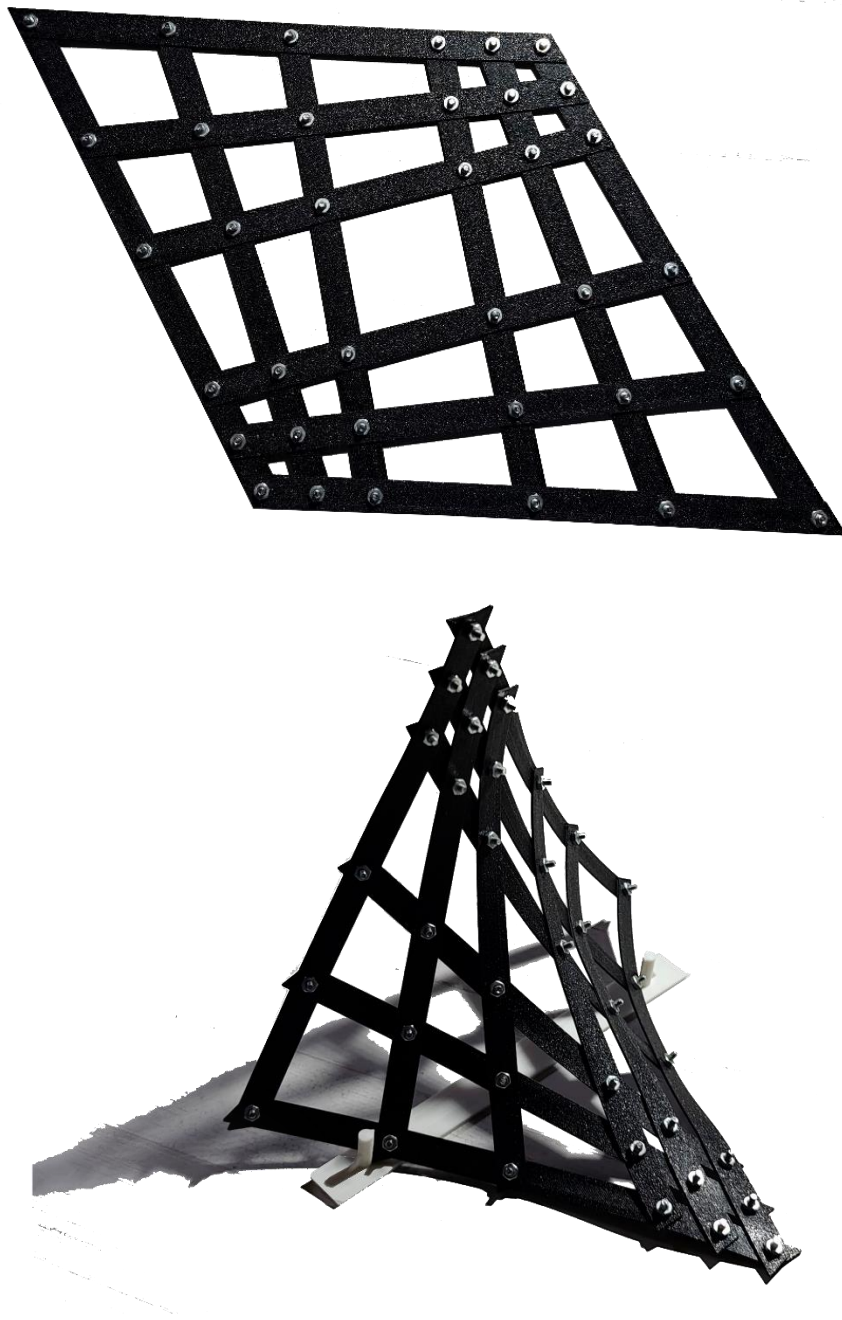


IMAGEN 4.5. Primera maqueta de *gridshell* elástica de doble curvatura anticlástica

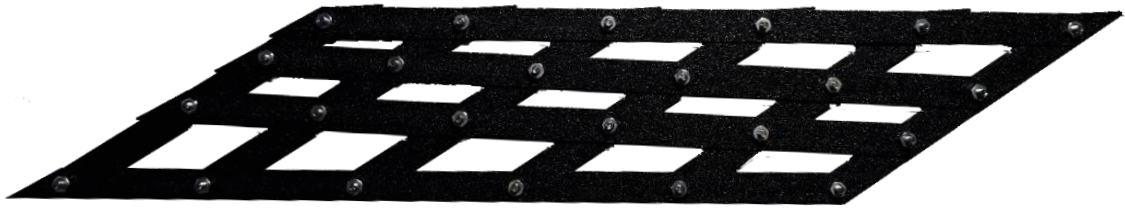


IMAGEN 4.6. Segunda maqueta de *gridshell* elástica de doble curvatura anticlástica

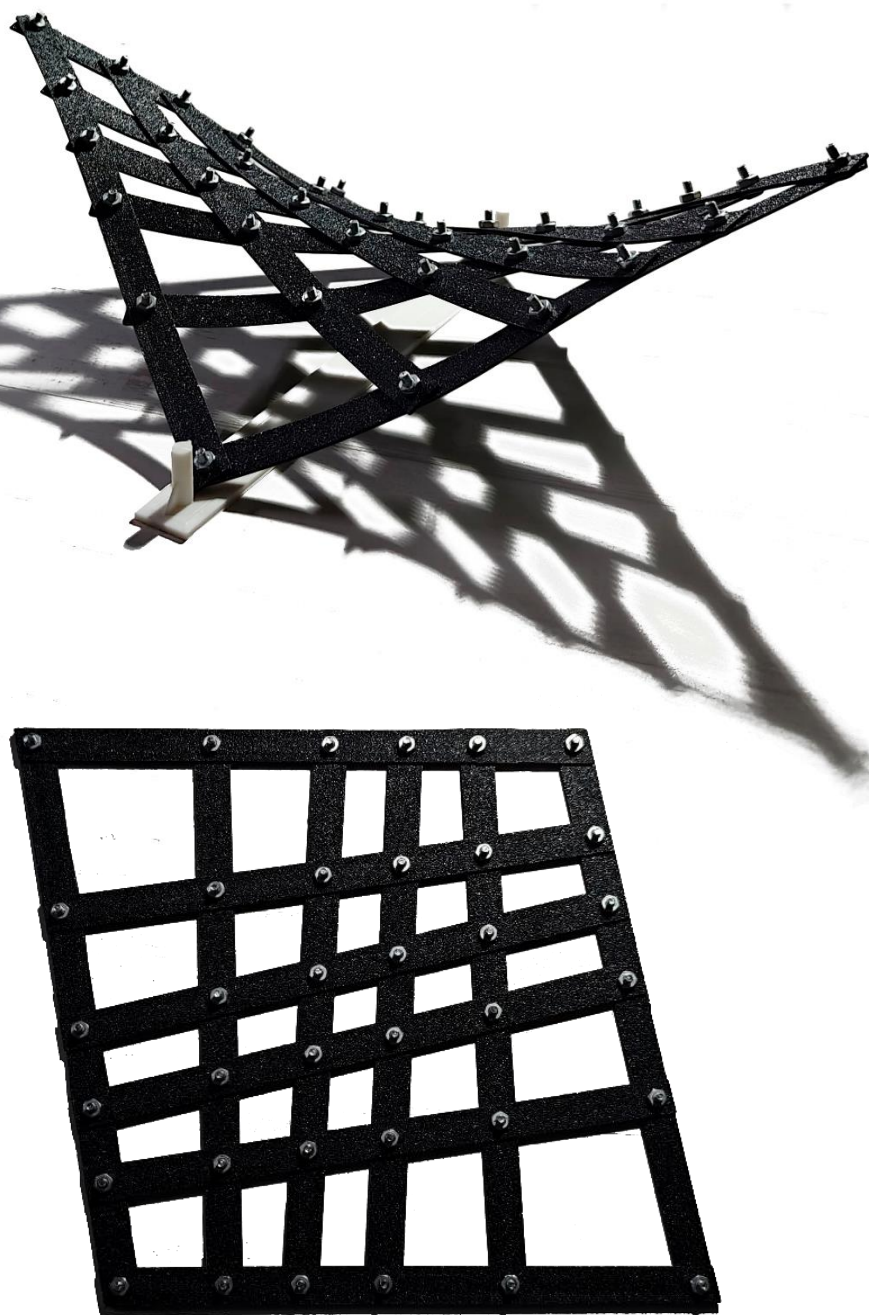


IMAGEN 4.7. Tercera maqueta de *gridshell* elástica de doble curvatura anticlástica

o

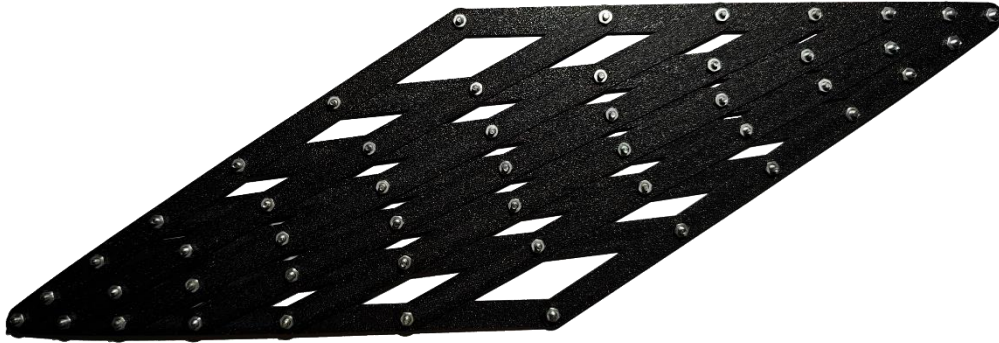


IMAGEN 4.8 Maqueta de *gridshell* elástica de doble curvatura sinclástica

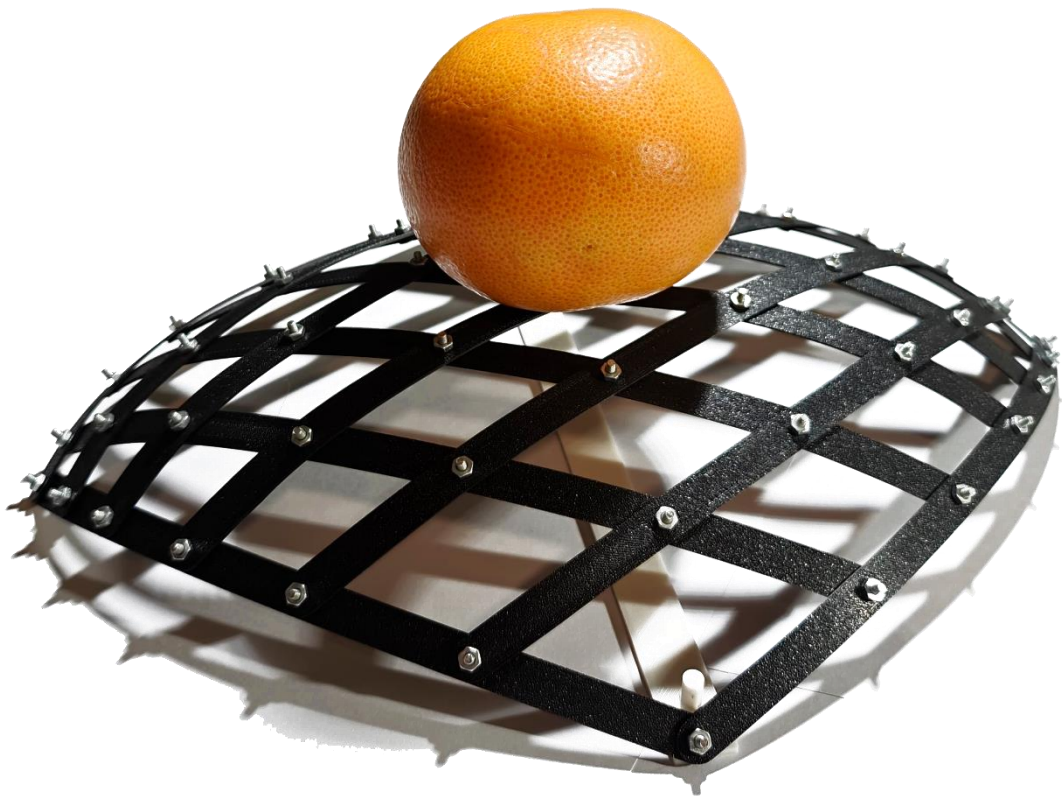


IMAGEN 4.9. *Gridshell* elástica de doble curvatura sinclástica.

Debido a su naturaleza pretensada, las *gridshells* elásticas son capaces de soportar grandes cargas con un uso mínimo de material.

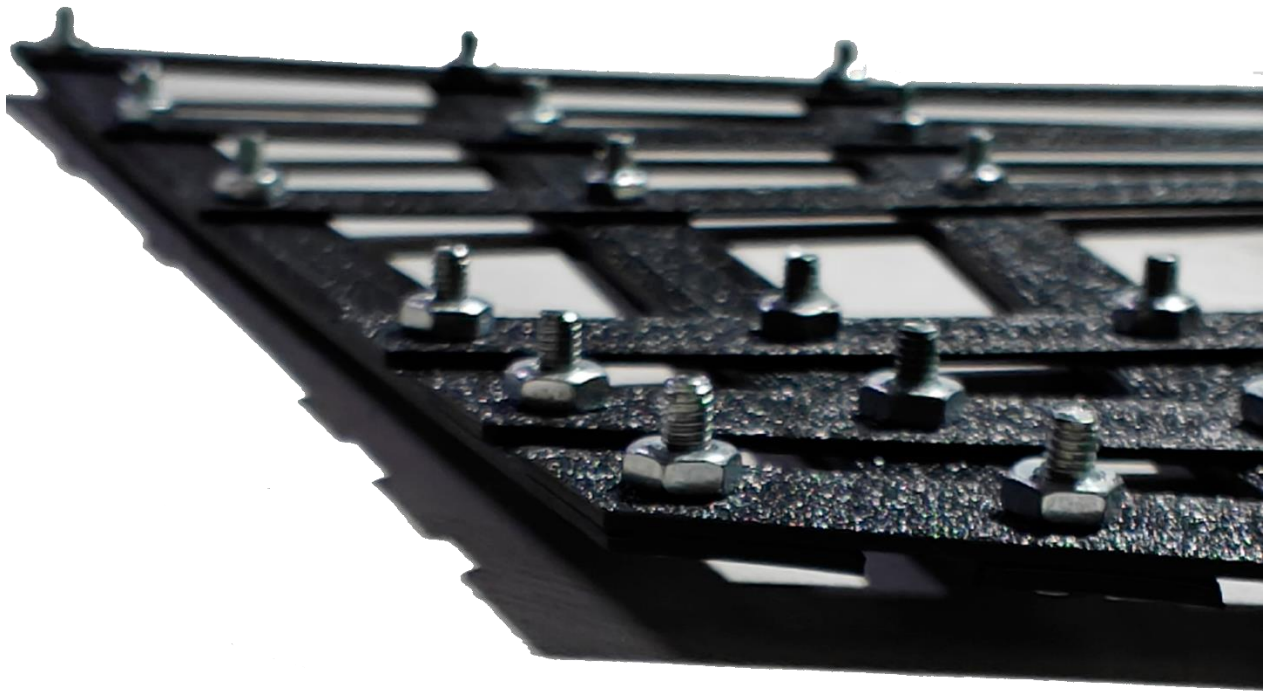


IMAGEN 4.10. Detalle de las articulaciones de las maquetas. Mecanismo de tuerca con tornillo (\varnothing 28mm)

4.2.3. Simulación del mecanismo de despliegue

Ya hemos explicado que la simulación exacta de la geometría final puede ser inexacta, pero podemos tratar de realizar un primer análisis del comportamiento tridimensional de la malla utilizando el método de relajación dinámica mediante la herramienta Kangaroo2 en Grasshopper. Este análisis computacional asegura que las mallas cumplan con las siguientes restricciones físicas y geométricas:

Inextensibilidad de los elementos:

- Las tablas que forman la malla no pueden estirarse ni doblarse fuera de su plano.

Coplanaridad en las intersecciones:

- Los puntos de cruce de las tablas deben ser coplanares, garantizando que las normales de las geodésicas coincidan en esos puntos.

Modelo físico discreto:

- La malla se modela como una red triangular gruesa con rigidez en las bisagras.
- Se aplica una relajación coplanar en un grupo de puntos cercanos a cada intersección para optimizar la precisión geométrica.
- También se utiliza un modelo geodésico discreto, asegurando que los ángulos opuestos en cada vértice sean iguales, simulando el comportamiento de un modelo físico real.



IMAGEN 4.12. Algunas de las maquetas elaboradas para este TFG

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Redactar y desarrollar este Trabajo de Fin de Grado ha supuesto un gran reto por la complejidad de varios de los conceptos, computacionales y matemáticos, que se presentan; así como por las barreras que los limitados recursos disponibles me han impuesto. A través del estudio de las *gridshells* elásticas y su desarrollo del plano al espacio, he podido explorar una temática poco desarrollada en la actualidad, que integra diseño paramétrico, experimentación estructural y fabricación digital.

Si bien los resultados obtenidos son satisfactorios en el contexto académico, dejan entrever líneas de investigación futuras para su aplicación a la construcción de estructuras a gran escala, que, por las limitaciones intrínsecas de mi trabajo, no he podido desarrollar en profundidad.

Desde el punto de vista técnico, las principales herramientas computacionales a las que he tenido acceso han sido el plug-in de Rhino 7, Grasshopper, y, para la materialización de las maquetas, la impresora 3d Elegoo Neptune 4 Plus. Con ello, he podido llevar a cabo modelos que conectan el estudio teórico con modelos físicos. Todo apunta a que otros programas de cálculo más potentes como Ansys, Abaqus o MatLab, ayudarían a la elaboración de un sistema más complejo y avanzado que permita cálculos más precisos y simulaciones más detalladas para un mejor desarrollo de las *gridshells* elásticas.

Con este tipo de herramientas, se hubiera facilitado la implementación del enfoque del camino inverso, incluso considerando propiedades materiales y estructurales para generar geometrías optimizadas, lo que habría ofrecido una dimensión adicional al análisis. Este método habría permitido avanzar hacia un diseño más integrado y adaptativo, pero habría requerido recursos computacionales más avanzados y una infraestructura de simulación a la que no he tenido acceso.

También creo importante considerar la escala de los modelos experimentales. La posibilidad de trabajar con prototipos de

mayor tamaño habría ayudado a estudiar con mayor precisión el comportamiento real de las *gridshells*, analizando fenómenos como deformaciones, tensiones y el efecto de la elasticidad en su rendimiento estructural. Esto habría sido posible con herramientas más grandes y avanzadas que mi impresora 3D, como una cortadora láser o una máquina CNC, que permiten trabajar con materiales más robustos y de mayores dimensiones. Estas herramientas ampliarían el rango de materiales utilizables y permitirían incorporar detalles y conexiones más cercanas a las condiciones reales de las *gridshells* en proyectos a escala arquitectónica. Pese a todo, reducir la escala de los modelos se ha convertido en un incentivo para optimizar los procesos de diseño, maximizando la información extraída de los experimentos realizados.

La realización de este trabajo me invita a reflexionar sobre la relación entre los límites técnicos y la creatividad en el ámbito arquitectónico. Las limitaciones de medios y recursos, lejos de ser un impedimento, en ocasiones se convierten en un motor de innovación, llevando la exploración hacia soluciones factibles y efectivas.

Es innegable el potencial de las *gridshells* elásticas como forma de aproximar superficies de forma libre y como método de generación de nuevos espacios en la arquitectura. Este potencial, del que todavía no se ha explorado lo suficiente, abre un gran abanico de posibilidades para la investigación y su aplicación a soluciones de la vida real. Entre ellas, destaco la combinación de las herramientas más avanzadas para el análisis estructural con el uso de materiales sostenibles y la implementación de técnicas híbridas que permitan superar las limitaciones actuales.

PROCEDENCIA DE LAS IMÁGENES

Capítulo 1

1.1. Maqueta realizada durante el Taller Experimental II junto a ETSAMadera. - Elaboración propia

Capítulo 2

2.1. Geodésicas de una superficie - Elaboración propia

2.2. Torsión de las curvas de una superficie - Soriano, E. (2017). *Low-Tech Geodesic Gridshell: Almond Pavilion*. *Archi Doct*, 8.

2.3. *Gridshell* del Vyksa Steel Production Hall - <https://structurae.net/en/structures/vyksa-steel-production-hall>

2.4. Polydome EPFL - <https://actu.epfl.ch/news/tribute-to-professor-emeritus-julius-natterer/>

2.5. *Gridshell* del Mannheim Multihalle - https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Herzogenriedpark_Mannheim_Multihalle_Deckenkonstruktion.jpg

2.6. *Kings Cross Station* - <https://seele.com/references/kings-cross-railway-station>

2.7. *Centre Pompidou Metz* - <https://www.archdaily.cl/cl/02-351391/centre-pompidou-metz-shigeru-ban-architects>

Capítulo 3

3.1. Pabellón Ark Nova - <https://arquitecturaviva.com/works/lucerne-festival-ark-nova>

3.2. Cubierta del Zoo de Berlín - <https://www.sbp.de/en/project/house-for-hippopotamus-zoo-berlin/>

Capítulo 4

4.1. Esquema pensamiento de despliegue - Elaboración propia

4.2. Maquetas base (estado plano) - Elaboración propia

- 4.3. Maquetas base desplegadas - Elaboración propia
- 4.4. Desarrollo de la disposición de los elementos de la malla - Soriano, E., Sastre, R. & Boixader, D. (2019). *G-shells: flat collapsible geodesic mechanisms for gridshells*.
- 4.5. Primera maqueta de *gridshell* elástica de doble curvatura anticlástica - Elaboración propia
- 4.6. Segunda maqueta de *gridshell* elástica de doble curvatura anticlástica - Elaboración propia
- 4.7. Tercera maqueta de *gridshell* elástica de doble curvatura anticlástica - Elaboración propia
- 4.8. *Gridshell* elástica de doble curvatura sinclástica - Elaboración propia
- 4.9. *Gridshell* elástica de doble curvatura sinclástica - Elaboración propia
- 4.10. Detalle de las articulaciones de las maquetas. Mecanismo de tuerca con tornillo (\varnothing 28mm) - Elaboración propia
- 4.11. Diagrama de división de la curva borde y distribución de los elementos. Búsqueda de la distribución óptima - Elaboración propia
- 4.12. Algunas de las maquetas elaboradas para este TFG – Elaboración propia

BIBLIOGRAFÍA

Artículos y libros.

- Baek, C., Sageman-Furnas, A. O., Jawed, M. K., & Reis, P. M. (n.d.). *Form finding in elastic gridshells. Proceedings of the National Academy of Sciences*. Massachusetts Institute of Technology, University of Goettingen, and Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Pillwein, S., & Musialski, P. (2021). *Generalized deployable elastic geodesic grids. ACM Transactions on Graphics, 40(6), Article 271, 1–15.* <https://doi.org/10.1145/3478513.3480516>
- Soriano, E., Sastre, R. & Boixader, D. (2019). *G-shells: flat collapsible geodesic mechanisms for gridshells*. ETS d'Arquitectura del Vallès BarcelonaTech

Barnes, M. (1977). *Form-finding and analysis of tension space structures by dynamic relaxation*. London: University of The City.

Ceccato, C., Hesselgren, L., Pauly, M., Pottmann, H., & Wallner, J. (Eds.). (2010). *Advances in architectural geometry 2010*. Springer.

Cerverá Sardá, M. R., Dusoiu, E-C. & Nicoleta Lascu, T. (2023) *Architecture Inspired by Nature. Experimenting Bionics*. Springer

IABSE. (2019, marzo 27-29). *LABSE Symposium 2019 Guimarães: Towards a resilient built environment - Risk and asset management*. Guimarães, Portugal.

Rueda S. *“Formas libres I: Curvas Nurbs”* (2015) Universidad Politécnica de Madrid.

Rueda S. *“Formas libres II: Curvas Nurbs”* (2015) Universidad Politécnica de Madrid.

Soriano, E. (2017). *Low-Tech Geodesic Gridshell: Almond Pavilion*. *Archi Doct*, 8.

Universidad de Sonora. *“XXXI Semana Nacional de Investigación y Docencia en Matemáticas. Curvas de Bézier”*.

Páginas web y vídeos.

Pillwein, S., Leimer, K., Birsak, M., & Musialski, P. (2020, julio). *On elastic geodesic grids and their planar to spatial deployment* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=FkPp9f4sRYc>

Afiliaciones: TU Wien, KAUST, NJIT.

Pillwein, S., Kubert, J., Rist, F., & Musialski, P. (2020, noviembre). *Design and fabrication of elastic geodesic grid structures*. [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=08BLVCdcM_I&t=1s

Afiliaciones: TU Wien, KAUST, NJIT.

Pillwein, S., & Musialski, P. (2021, noviembre). *Generalized deployable elastic geodesic grids* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=ja1DGjYGCv0>

Structurae. (2018). *Vyksa Steel Production Hall (Vyksa, 1898)*. Structurae. [Online]. Available at: <https://structurae.net/structures/vyksa-steel-production-hall> (consultado el 19 de diciembre de 2024).

https://es.wikipedia.org/wiki/Fibra_neutra (Consultado el 4 de enero de 2025)

https://es.wikipedia.org/wiki/Línea_geodésica (Consultado el 4 de enero de 2025)

