



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Arquitectura

ENCOFRADOS VIVOS: Paraboloides Hiperbólicos de
Madera Laminada como Estructura Social

Trabajo Fin de Grado

Grado en Fundamentos de la Arquitectura

AUTOR/A: Esplugues Catalán, Jorge

Tutor/a: Sentieri Omarrementeria, Carla

Cotutor/a: Gallardo Llopis, David

CURSO ACADÉMICO: 2024/2025

*Madera Laminada CNC | Paraboloide Hiperbólico | Modulación Fractal | Arquitectura sostenible
Achim Menges*

Las cubiertas laminares de hormigón que definieron la arquitectura del siglo XX enfrentan hoy un desafío existencial: su construcción es demasiado costosa y contaminante para nuestro tiempo. Este trabajo nace de una pregunta urgente: ¿cómo rescatar su belleza estructural sin replicar los métodos tradicionales? La respuesta está en una reinvención radical: sustituir el hormigón por madera laminada, transformando lo que en su momento servía únicamente como encofrado en la estructura final. Inspirados en la lógica digital de Achim Menges, se pretende transformar la complejidad morfológica en simplicidad modular.

La propuesta se articula alrededor de piezas de madera laminada cortadas con precisión digital, que se ensamblan como un puzzle tridimensional para formar paraboloides hiperbólicos. Cada módulo encaja con los demás mediante uniones machihembradas casi imperceptibles, creando superficies continuas sin soportes intermedios. La magia reside en su escalabilidad fractal: esas mismas piezas pueden subdividirse o ampliarse, permitiendo pabellones de diferentes dimensiones según la necesidad, pero manteniendo siempre la viabilidad y simplicidad del montaje y transporte.

Con esto se trata de devolver las estructuras laminares a la vida cotidiana. La madera y los métodos de fabricación digital convierten lo que fue un lujo técnico en una herramienta de justicia espacial. Los pabellones resultantes son más que cubiertas: son espacios vivos que acogen mercados, ayudan a comunidades en emergencias y celebran encuentros ciudadanos. Así, el legado de Candela y la innovación de Menges se funden en un manifiesto proyectual: la belleza estructural, cuando nace de la ética y la aportación colectiva, puede llegar a ser sostenible, económica y profundamente social.

CNC Laminated Timber | Hyperbolic Paraboloid | Fractal Modulation | Sustainable Architecture
Achim Menges

The thin concrete shells that defined 20th-century architecture now face an existential challenge: their construction is too costly and polluting for our time. This project emerges from an urgent question: how can we rescue their structural beauty without replicating traditional methods? The answer lies in a radical reinvention: replacing concrete with laminated timber, transforming what once served only as formwork into the final structure itself. Inspired by the digital logic of Achim Menges, the aim is to turn morphological complexity into modular simplicity.

The proposal is built around digitally cut laminated timber pieces, assembled like a three-dimensional puzzle to form hyperbolic paraboloids. Each module fits seamlessly with the others through nearly invisible tongue-and-groove joints, creating continuous surfaces without intermediate supports. The magic lies in its fractal scalability: the same pieces can be subdivided or expanded, allowing for pavilions of various sizes depending on the need, while always maintaining the feasibility and simplicity of assembly and transport.

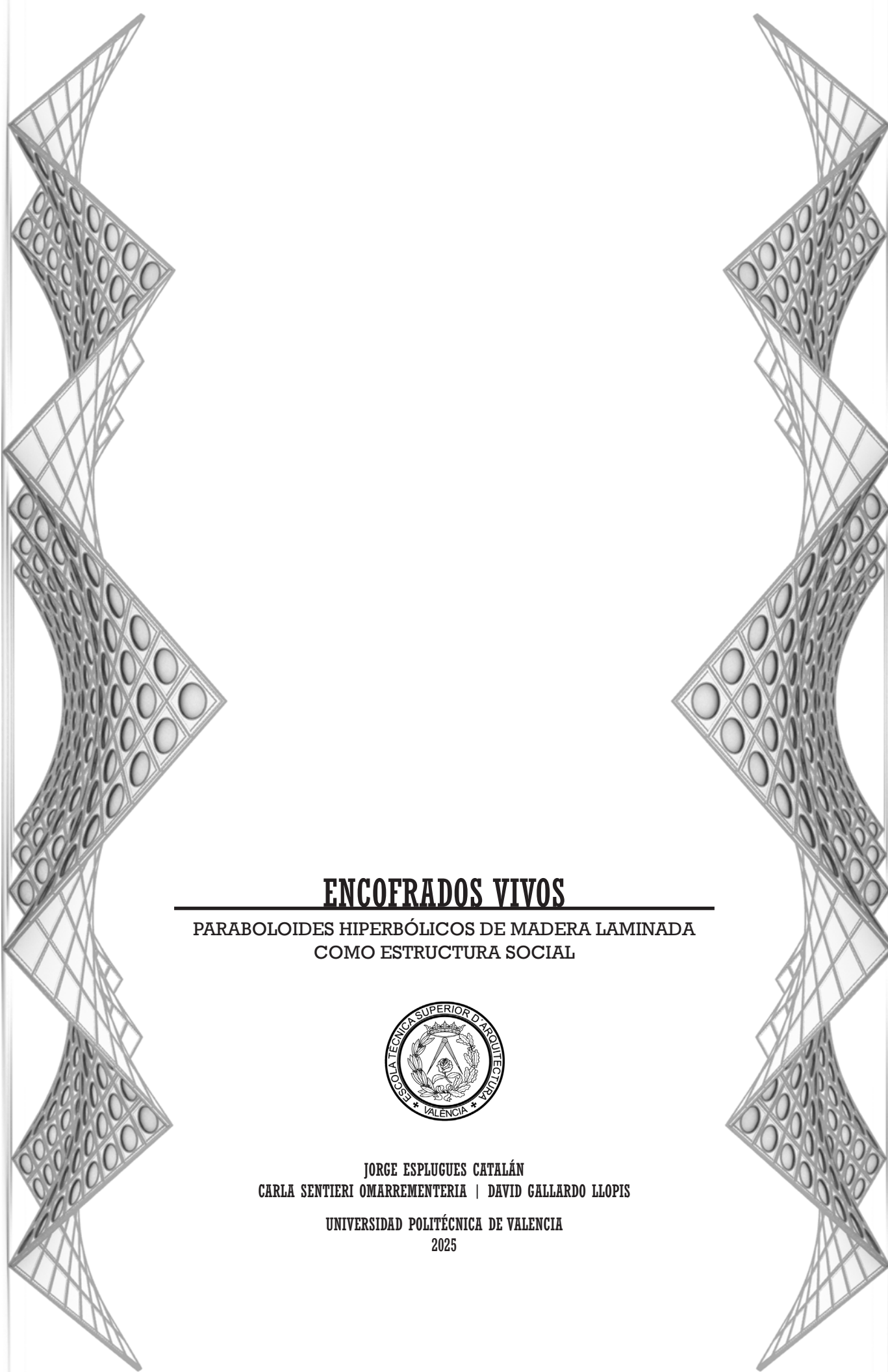
The goal is to bring shell structures back into everyday life. Timber and digital fabrication methods turn what was once a technical luxury into a tool for spatial justice. The resulting pavilions are more than just roofs: they are living spaces that host markets, support communities in emergencies, and celebrate civic gatherings. In this way, the legacy of Candela and the innovation of Menges merge into a design manifesto: structural beauty, when born from ethics and collective contribution, can become sustainable, economical, and deeply social.

Fusta Laminada CNC | Paraboloide Hiperbòlic | Modulació Fractal | Arquitectura Sostenible
Achim Menges

Les cobertes laminars de formigó que definiren l'arquitectura del segle XX s'enfronten hui a un desafiament existencial: la seua construcció és massa costosa i contaminant per al nostre temps. Aquest treball naix d'una pregunta urgent: com rescatar la seua bellesa estructural sense replicar els mètodes tradicionals? La resposta està en una reinvenió radical: substituir el formigó per fusta laminada, transformant allò que en el seu moment servia únicament com a encofrat en l'estructura final. Inspirats en la lògica digital d'Achim Menges, es pretén transformar la complexitat morfològica en simplicitat modular.

La proposta s'articula al voltant de peces de fusta laminada tallades amb precisió digital, que s'assemblen com un puzzle tridimensional per a formar paraboloides hiperbòlics. Cada mòdul encaixa amb els altres mitjançant unions mascle-femella quasi imperceptibles, creant superfícies contínues sense suports intermedis. La màgia resideix en la seua escalabilitat fractal: eixes mateixes peces poden subdividir-se o ampliar-se, permetent pavellons de diferents dimensions segons la necessitat, però mantenint sempre la viabilitat i simplicitat del muntatge i del transport.

Amb això es tracta de retornar les estructures laminars a la vida quotidiana. La fusta i els mètodes de fabricació digital convertixen allò que va ser un luxe tècnic en una ferramenta de justícia espacial. Els pavellons resultants són més que cobertes: són espais vius que acullen mercats, ajuden comunitats en emergències i celebren trobades ciutadanes. Així, el llegat de Candela i la innovació de Menges es fonen en un manifest projectual: la bellesa estructural, quan naix de l'ètica i de l'aportació col·lectiva, pot arribar a ser sostenible, econòmica i profundament social.



ENCOFRADOS VIVOS

PARABOLOIDES HIPERBÓLICOS DE MADERA LAMINADA
COMO ESTRUCTURA SOCIAL



JORGE ESPLUGUES CATALÁN
CARLA SENTIERI OMARREMENTERIA | DAVID GALLARDO LLOPIS

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
2025

PROLOGO	6
INTRODUCCION: EL LEGADO EN CRISIS	8
1.1 Auge y Ocaso de las Láminas	13
1.2 Rescatar El Rebollet como Laboratorio de Investigación	15
1.2 ¿Cómo Recuperar las Láminas sin Repetir los Errores?	17
LA CURVA QUE TRANSCIENDE ERAS	18
2.1 Félix Candela: Revolución Geométrica en el Hormigón	19
2.2 Achim Menges: Revolución digital-material	23
2.3 Fusión Candela-Menges: Sinergia de Eras	30
2.4 Análisis Comparativo: Hormigón vs. Madera Laminada	32
2.5 Paraboloides Hiperbólicos de Madera s.XX	34
SISTEMA FRACTAL: DE MAQUETA A MERCADO	35
3.1 Autopsia del Paraboloide Hiperbólico	36
3.2 Módulos que Cobijan	39
3.3 Arquitectura Semilla	43
HACIA UNA INDUSTRIA ETICA.....	45
4.1 Objetivos: La Arquitectura como Compromiso Ético.....	46
4.2 Agenda 2030	47
CONCLUSIONES: LO SUBLIME COMO DERECHO SOCIAL.....	49
BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS	53

0

PROLOGO

Las sociedades avanzan cuando desafían lo imposible. Desde las primeras cabañas hasta las catedrales góticas, cada civilización ha expresado su conocimiento a través de estructuras que protegen y desafían la gravedad. La arquitectura, en su esencia, es el testimonio material de ese progreso.

Roma levantó el Panteón para demostrar que eran capaces de enmarcar el cielo en su óculo de hormigón. Los maestros del gótico transformaron la densa piedra en filamentos estructurales, mientras el Islam moldeaba bóvedas de la forma más artística posible. Luego, la Revolución Industrial presumió de levantar todo un palacio de acero y vidrio en Londres. Recientemente, en el siglo XX, arquitectos como Félix Candela, convirtieron el pesado hormigón en láminas delgadas: cascarones que cubrían estadios y mercados con apenas centímetros de espesor. Eran la cúspide de una era donde la estructura y la forma se fusionaba en armonía.

Pero ese sueño se agrietó. Las complejas cimbras de madera, el alto coste del hormigón y la huella medioambiental enterraron este último hito bajo el pragmatismo del Movimiento Moderno. La sencillez de la caja de hormigón eclipsó la osadía de la curva, sacrificando poesía estructural en nombre de la eficiencia industrial. Las estructuras laminares se convirtieron en fósiles de una época donde la misma expresión de belleza era sinónimo de complejidad insostenible.

Hoy, el siglo XXI nos devuelve una oportunidad única. La fabricación digital, la robótica y los materiales como la madera permiten rescatar aquel legado. El software paramétrico convierte formas complejas en instrucciones precisas; los brazos robóticos cortan la madera con precisión; y los bosques certificados ofrecen un material humano, renovable y sostenible. La industrialización ya no es enemiga de la singularidad: es su aliada.

Achim Menges encarna esta revolución. Sus pabellones de madera laminada, ensamblados como relojería suiza, prueban que lo sublime puede ser digital, rápido y circular. Su trabajo no es solo una demostración del avance tecnológico: es un manifiesto sobre cómo construir hitos sin deuda ambiental.

Aquí reside nuestra apuesta: tomar la compleja geometría de Candela y la técnica innovadora de Menges para plantear las estructuras laminares del siglo XXI. Paraboloides hiperbólicos nacidos de bosques sostenibles, cortados por robots y montados como puzzles tridimensionales. La madera sustituye al hormigón; la fabricación digital al encofrado perdido; y la autoportancia a los numerosos soportes.

La pregunta que toca hacerse es: ¿Podrán las herramientas del siglo XXI resucitar el esplendor estructural del siglo XX para servir a la sociedad desde una perspectiva ética? Este trabajo pretende ser un puente entre eras, donde la curva deja de ser lujo para convertirse en derecho social.

1

INTRODUCCION: EL LEGADO EN CRISIS

Antes de empezar con esta disertación creo pertinente resaltar el avance y el valor de las estructuras que nos competen, ya no solo por acercar al lector al concepto y funcionamiento de dichas formas, sino para hacer comprender la relevancia intrínseca de su mera existencia.

A lo largo de la historia, el hombre, en particular aquellos encargados de proyectar los espacios en los que va a refugiarse y convivir la ciudadanía, ha buscado superar, y materializar, los avances que cada sociedad ha logrado alcanzar en su época. No solo por una cuestión transcendental, buscando dejar marcado un legado para que generaciones futuras puedan constatar estos avances, sino para facilitar (los procesos) y mejorar (los espacios) en los que ellos mismos van a existir.

Remontémonos a la Roma Imperial, famosa, entre muchas cosas, por el uso del arco de medio punto para cubrir grandes luces y construir en altura con elementos de pequeñas dimensiones. Entendieron que, además de una cuestión estética, los arcos cuentan con una forma más eficiente para la distribución de cargas, y soportan, y distribuyen, más y mejor el peso que una viga, permitiéndoles salvar huecos de una manera más eficiente, además de poder edificar encima de estos. Es curioso cómo la propia forma del arco no es capaz de sustentarse por sí misma hasta que no están colocadas todas las piezas, y es ahí cuando, interactuando entre las mismas, consiguen trabajar de forma colaborativa para lograr mayor equilibrio y mejor distribución de cargas.

Otras civilizaciones, recuperando el legado y el conocimiento romano, empezaron a analizar y comprender los secretos que esta forma encerraba. El Islam y el Gótico, aunque no conjuntamente, llegaron a una misma conclusión sin siquiera conocer los preceptos matemáticos que generaban estas curvas. Se dieron cuenta de la cantidad de material, de los esfuerzos resultantes y de las presiones que ejercía el arco sobre la base, por lo que trabajaron en optimizar esta forma.

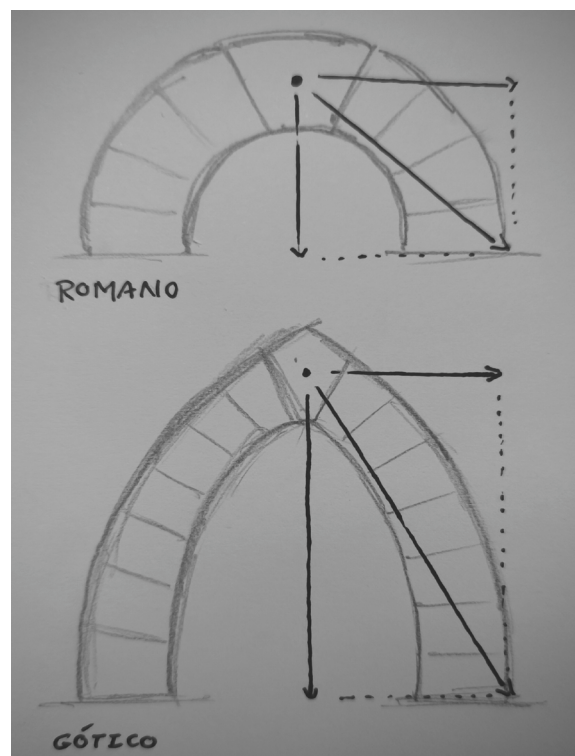


Figura 1. Imagen del autor. Distribución esfuerzos en arcos

De aquí surge el arco apuntado, una forma que no llega a ser una parábola, pero que logra transmitir más eficientemente los esfuerzos, de manera más vertical, disminuyendo el empuje lateral; logro que permitió levantar muros más altos, abrir vanos más amplios y dar una mayor sensación de verticalidad. Se consiguieron edificar prodigios estructurales con un conocimiento conceptual elevado pese a no haber extraído siquiera los conceptos matemáticos y físicos que albergaban estas curvas. Sin embargo, seguían enfrentando los problemas de los esfuerzos horizontales, lo que obligaba, en el caso del Gótico, a generar grandes contrafuertes que compensasen esta desviación.¹

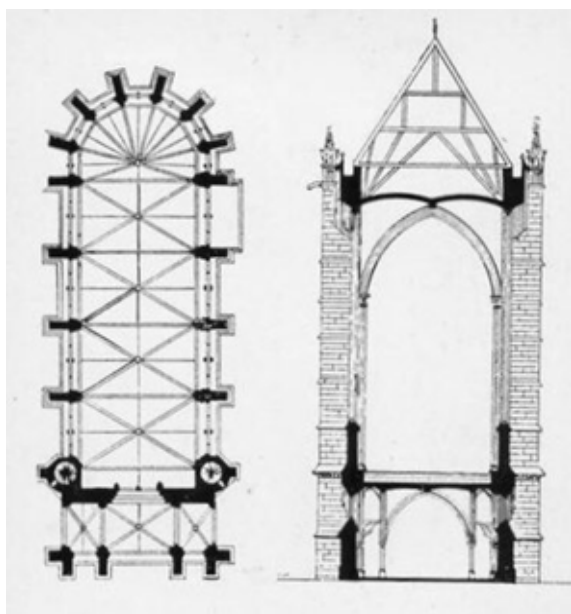


Figura 2. Sección Sainte Chapelle, Francia

No fue hasta 1670 que se abordó, por parte de Robert Hooke, la morfología del arco desde una base científica, lo que empezó a introducir el concepto de morfología funicular. Llegó a la conclusión, fascinado por la curiosa forma que adopta un cable colgado de dos puntos, que la silueta óptima para un arco rígido debía ser la inversa del cable. Habría que profundizar de una manera más técnica acerca de la distribución de tensiones, pero pretendo resaltar únicamente dos conceptos elementales:

La forma que adquiere un cable colgado de dos puntos se conoce como catenaria, y es la idónea, dado que sólo actúa la gravedad y se transmiten únicamente fuerzas de tracción; cada punto de este cable, al estar en equilibrio,

no cuenta con tensiones horizontales. Ahora démosle la vuelta; esa es la forma que debe tener un arco rígido que vaya a soportar únicamente su propio peso, la fuerza de la gravedad; y este, cuanto mayor es la altura, más despreciable es el esfuerzo horizontal que produce, únicamente transmitiendo estos empujes residuales en la base de cimentación

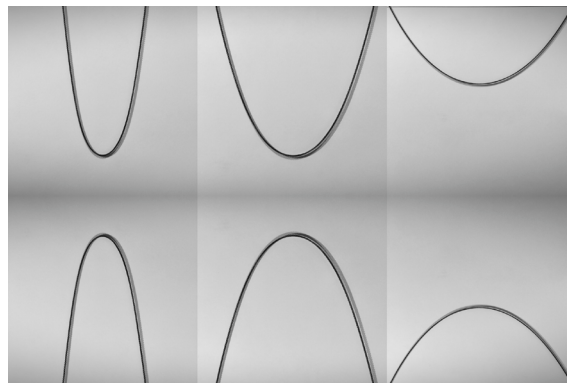


Figura 3. Imagen del autor. Catenarias e inversión

A mediados del siglo XVIII, Euler, recuperando la catenaria, y extrapolándola a las 3 dimensiones, rotándola sobre el eje x, planteó la primera base para las superficies de doble curvatura desde una perspectiva científica, un descubrimiento que cambiaría la teoría estructural hasta ese momento conocida; este tipo de superficies no acabaron de incorporarse a la propuesta arquitectónica hasta el siglo XX, donde figuras como Félix Candela y Eduardo Torroja lograron hitos inimaginables.²

Estas superficies, conocidas como “estructuras laminares”, delgadas y de doble curvatura, características por su gran superficie y pequeño espesor, respaldadas por las propias leyes intrínsecas de la naturaleza, asumiendo conceptos físico-geométricos propios de las formas funiculares, suponen la cúspide del conocimiento formal y el límite de la eficiencia estructural. Son superficies perfectas que, gracias a su forma, trabajan de la manera más eficiente posible, transmitiendo la totalidad de las cargas paralelamente a la superficie, a través de un canto mínimo de material

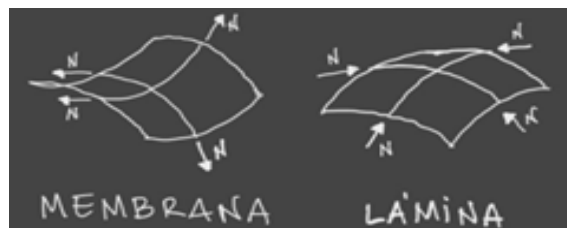


Figura 4. Dualidad esfuerzos en una superficie

Para ilustrarlo, imagínese una tela colgada de sus cuatro esquinas; esta tela generará una forma pura, donde cada punto trabaja únicamente a tracción dado que sólo actúa la fuerza de la gravedad; mismo concepto que la catenaria, si se le diese la vuelta, con esa misma forma se consigue una cubierta que actúa únicamente con esfuerzos de compresión. Este caso se le conoce como superficies sinclásticas, formas, generalmente cúpulas o cáscaras, que trabajan exclusivamente a compresión.

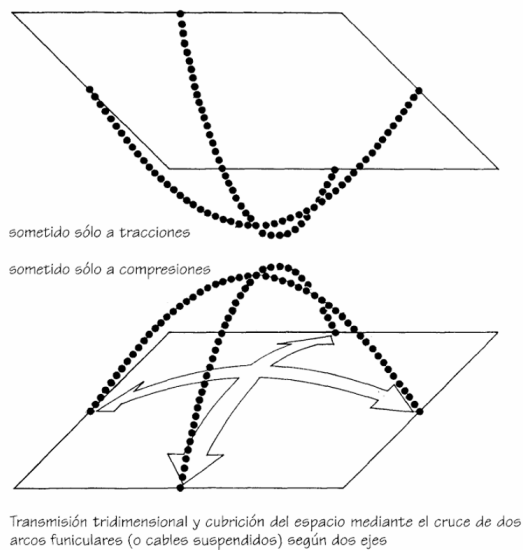


Figura 5. Esquema funicular formas sinclásticas.

Sin embargo, existen diferentes tipos de estructuras laminares, y no todas trabajan a compresión o tracción pura; otro tipo son las anticlásticas, donde la forma de esta superficie determina la eficiencia de la distribución de cargas; se conoce como esfuerzos de membrana, donde actúan de manera simultánea, y opuesta, esfuerzos de tracción y compresión, para lograr un equilibrio en la superficie de doble curvatura.³

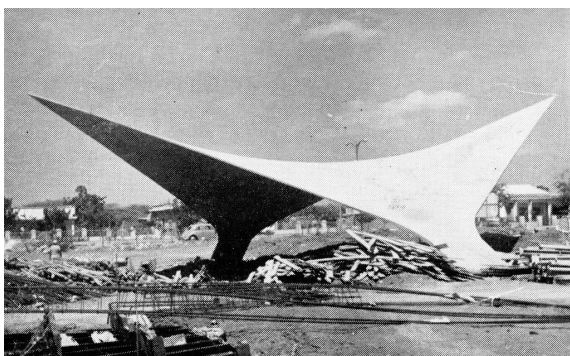


Figura 6. Paraboloides Hiperbólico anticlástico

Añadiendo ligeramente, las estructuras laminares se categorizan según su curvatura geométrica, siendo la distinción entre superficies sinclásticas y anticlásticas esencial para comprender su comportamiento estructural. Esta clasificación no es meramente formal, sino que determina cómo las fuerzas se distribuyen a través de la superficie, influyendo en su eficiencia, estabilidad y posibilidades constructivas.

Las superficies sinclásticas se caracterizan por presentar una curvatura en la misma dirección en todos sus puntos, como ocurre en una cúpula o una esfera. Esta configuración genera una superficie donde las dos curvaturas principales son del mismo signo, lo que permite resistir cargas uniformes mediante esfuerzos de compresión pura.

Por el contrario, las superficies anticlásticas presentan curvaturas opuestas en direcciones perpendiculares, como una “silla de montar” o un paraboloides hiperbólico. En estas superficies, una de las curvaturas principales es positiva y la otra negativa, lo que genera un comportamiento estructural distinto: mientras una dirección tiende a trabajar a compresión, la opuesta lo hace a tracción. Esta particularidad las hace extremadamente rígidas y eficientes, permitiendo formas ligeras y audaces como las famosas estructuras de Félix Candela.⁴

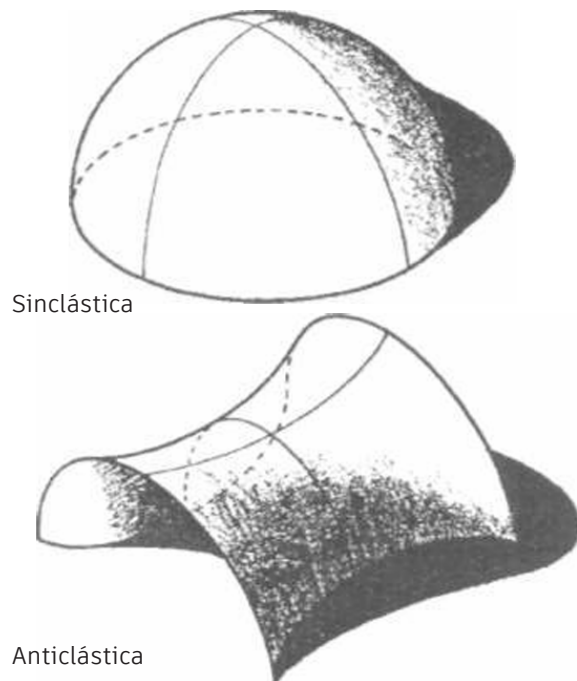


Figura 7. Dualidad superficies doble curvatura.

Estos modelos suponen un avance abismal en la metodología para cubrir espacios; permite cubrir enormes superficies -siempre y cuando se adapte a la forma necesaria y se controlen cuestiones de materiales, proporciones y esfuerzos externos- sin apenas apoyos y con el material exclusivamente necesario.

Por lo tanto, dado la notable relevancia -tanto histórica como conceptual- de dichas formas, se ha presentado este trabajo como una aproximación conceptual de una hipótesis reinterpretable para resucitarlas en nuestra era.

Se organiza en cinco apartados principales, tratando de hilar un proceso de investigación de lo que estas estructuras fueron, las posibilidades y referentes actuales en innovación y tecnología, una hipótesis de reinterpretación gracias a las capacidades que estos pioneros nos otorgan, y la consecuente propuesta proyectual donde se muestra el resultado de dicha investigación e hipótesis.

El preludeo, dado por finalizado, ha surgido en mayor parte gracias a la lectura y reflexión de numerosos libros conceptuales cortesía de uno de mis tutores, David Gallardo. Ejemplo de tales obras han sido: Razón y Ser de los Tipos Estructurales, Torroja (1960), Comprensión de las estructuras en arquitectura, Moore, F (2000) o Sistemas de estructuras, Engel, H (2009), entre otros.

A lo largo del primer punto se tratará la historia de estas láminas, un referente que aún sigue en pie y se planteará una pregunta retórica sobre cómo poder intervenir para recuperarlas. Este apartado se ha sustentado en las aportaciones previas de Eduardo Torroja (1960), Moore, Fuller (2000) y Peiró Bañuls, S. (2020), entre otros.

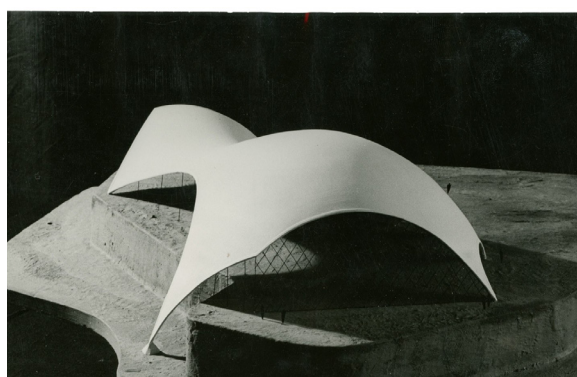


Figura 8. Maqueta Club de Táchira, 1956. Eduardo Torroja

A continuación, durante el segundo punto, se indice en la figura de Candela y Menges, además de su hipotética unión de conceptos -técnicos y tecnológicos- para aondar en esa sinergia conceptual, tratando también intentos de aplicar la madera -material referente en nuestra era- a las estructuras laminares del siglo XX. Para este tramo se ha recurrido a referentes como Parme, A. H. (1961), Blanco García, F. L. D. (2016) o la propia universidad de Stuttgart, laboratorio de trabajo de Menges, entre otros.

En el tercer punto se desarrolla y culmina la reinterpretación conceptual digital, trasladando los conceptos extraídos en apartados previos. Este es de elaboración propia en su totalidad, exceptuando ligeras referencias a Menges y sus propuestas proyectuales.

Una vez expuesto el desarrollo proyectual, se dedican varias páginas a reflexionar y tratar de concienciar retóricamente la deriva arquitectónica y constructiva de las últimas décadas, haciendo incapié en aspectos socioambientales tan presentes en nuestros días. Para ello se recogen y exponen las pautas dadas por las Naciones Unidas (2015), la Agencia Internacional de Energía (2019) o proyecciones a futuro exigidas por la Agenda 2030.

Para concluir este trabajo, se divaga en una reflexión sobre los espacios -los que tuvimos y los que tenemos- y sobre las sociedades -la que fuimos y la que somos-, además de resaltar los puntos cardinales que orientan esta propuesta y la arquitectura hacia un futuro próspero, concienciado y social.

El proceso de visualizar o concebir una estructura es un arte. Básicamente es motivado por una experiencia interna, por una intuición. Nunca es sólo resultado del razonamiento deductivo.

*-Eduardo Torroja
Moore, F., (2000). Comprensión de las estructuras en arquitectura. McGraw-Hill*

1.1 Auge y Ocaso de las Láminas⁵

A lo largo de la historia, ciertas mentes han sido capaces de llevar el conocimiento común al límite, siendo capaces incluso de sentar las bases que determinaron su futuro, aquello que hoy consideramos el presente. Me gusta pensar, y creo firmemente, que una sociedad sólo es capaz de avanzar cuando la intuición, de manera coherente, prevalece sobre el conocimiento; cuando nos atrevemos a desafiar lo convencional en lugar de perpetuar lo ya descubierto.

A principios del siglo XX, ingenieros visionarios como Robert Maillart, quien aplicó la forma funicular para crear puentes y cubiertas de extraordinaria complejidad, o Eduardo Torroja, el genio español que desveló las posibilidades estéticas y estructurales del hormigón armado, descubrieron las propiedades únicas de la doble curvatura. Comprendieron que la geometría podía convertirse en estructura, que la forma misma podía resistir.

Aquello trascendía la mera construcción para convertirse en escultura estructural: la búsqueda de la máxima expresión con el mínimo material, el dominio de los principios naturales que rigen la geometría, la física y la ciencia de los materiales. Entre los maestros de estas formas, tres figuras españolas resultan particularmente relevantes para comprender la esencia de estas estructuras y su potencial para inspirar nuevas propuestas.

Eduardo Torroja fue un ingeniero español, que, a principios del siglo XX, descifrando los secretos de la geometría, los esfuerzos en superficies de doble curvatura y la ciencia de los materiales, principalmente del hormigón armado, logró unos hitos constructivos que rápidamente sirvieron como referentes a mentes internacionales. Su aliado era la lógica, diseñaba la estructura curvada a partir de ecuaciones, no de caprichos. Fue también el fundador del Instituto Técnico de Construcción y cemento en 1949. Ejemplos de tales proezas son el mercado de Algeciras o las tribunas del hipódromo de la Zarzuela en Madrid.

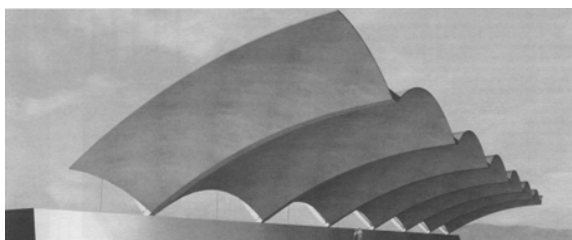


Figura 9. Maqueta cubierta Hipódromo de la Zarzuela

Félix Candela (1910-1997), arquitecto exiliado en México, demostró que la geometría de los paraboloides hiperbólicos podía trazarse con la simple elegancia de regla y compás. Esta aparente sencillez escondía una profunda comprensión de cómo los esfuerzos se transmiten naturalmente a través de las superficies curvas. En obras como el restaurante Los Manantiales o el Oceanográfico de Valencia, Candela elevó el hormigón hasta convertirlo en ligera tela pétrea, transformando el cálculo estructural en arte habitable.

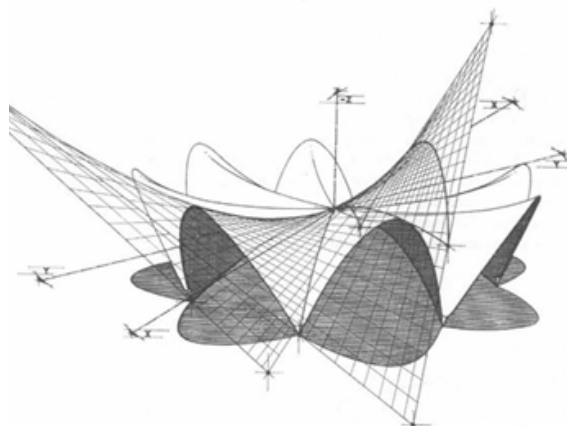


Figura 10. Diagrama restaurante Los Manantiales.

Por último, Juan de Haro Piñar, discípulo de Torroja, acercó estas láminas a la cotidianidad. Proyectó una gasolinera (El Rebollet) en la Comunidad Valenciana con seis paraboloides hiperbólicos de planta cuadrada. Quiero resaltar este caso puesto que, pese que no haya sido el inventor de este tipo de paraboloides hiperbólicos reglados, concepto que desarrollaré más adelante, esta obra es de tal pureza que he considerado idónea para adoptarla como base conceptual del proyecto que nos compete.⁶



Figura 11. Gasolinera El Rebollet

El declive de estas láminas, como hito estructural, llegó en parte porque sus escultóricas curvas se vieron opacadas por el gigante industrial y estandarizado de las cajas ortogonales de vidrio y hormigón propias del movimiento moderno, y, en parte, por la cada vez más precaria, en comparación a los avances industriales, forma de construir estas estructuras.

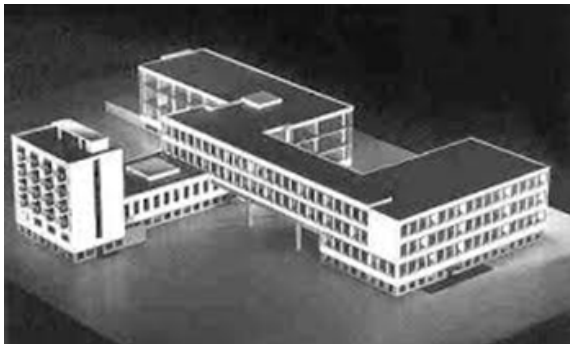


Figura 12. Edificio de la Bauhaus en Dessau

Entraremos en detalle más adelante, pero, ya no sólo se dieron cuenta de la fragilidad de estas láminas, sino que todo el proceso era demasiado costoso: la mano de obra de estas estructuras complejas, el tiempo en producirlas, la incoherencia de los complejos encofrados para su posterior desecho, la enorme huella de carbono... todo indicaba que estaban al borde del abismo.

Y así fue, estas láminas fueron el último baluarte de una arquitectura que apostaba por la poesía estructural, por la búsqueda del prodigio técnico materializado para la sociedad. Murieron por su audacia: su delgadez extrema las hizo vulnerables, su exigente artesanía las hizo inviables, y su material principal, el hormigón, las condenó ecológicamente.

Ahora estas láminas, expuestas como reliquias de museos, inviables en nuestra era, nos susurran.

Sugieren varias preguntas: ¿acaso su audacia y prodigio formal no es admirable?, ¿acaso estas láminas no son la cúspide del conocimiento estructural y formal?, ¿acaso nosotros no tenemos, gracias a los avances de nuestra generación, capacidad de mejorar lo que ellos no pudieron?, ¿acaso no debemos, como sociedad, y como arquitectos, demostrar a nosotros mismos, y a generaciones venideras, de qué somos capaces?

Y me di cuenta que existen hombres en nuestro tiempo que crearon belleza, objetos bellos, bellos porque fueron hechos lógicamente, según los principios racionales del ser de los objetos y según las leyes exactas, necesarias y naturales del material empleado en su fabricación.

-Henry Van De Velde

Moore, F., (2000). *Comprensión de las estructuras en arquitectura*. McGraw-Hill



Figura 13. Capilla abierta de Cuernavaca, Palmira, México. Félix Candela

1.2 Rescatar El Rebollet como Laboratorio de Investigación⁷

La gasolinera El Rebollet (Oliva, Valencia, 1962), obra del ingeniero Juan de Haro Piñar (1922-2012), representa la aplicación pragmática de las estructuras laminares a la arquitectura cotidiana. Discípulo de Eduardo Torroja, Haro Piñar diseñó este proyecto durante el desarrollo turístico de la costa mediterránea española, demostrando que la complejidad estructural podía adaptarse en programas funcionales comunes.



Figura 14. Vista peatón gasolinera El Rebollet

Esta gasolinera cuenta con tres espacios principales, cada uno característico por su geometría y singularidad. El primero, y el que realmente nos supone especial interés, es la zona administrativa y de lavado, espacio cubierto por 6 parabolooides hiperbólicos de hormigón armado visto de planta cuadrada; el segundo es la zona de repostaje, curioso y llamativo también debido a las marquesinas fungiformes con los que cubre este espacio; y por último, la zona de restaurante, un edificio con forma sinuosa de estructura metálica con toda la superficie de fachada acristalada.

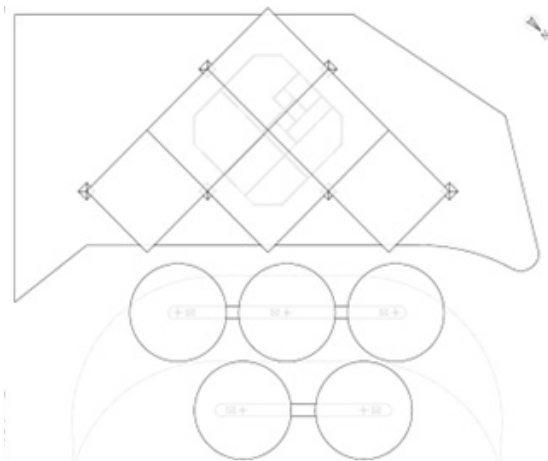


Figura 15. Planta comercio y repostaje El Rebollet

Profundicemos brevemente en la cubierta compuesta por parabolooides. Consta de seis parabolooides hiperbólicos de planta cuadrada (7x7m) apoyados en sus vértices bajos sobre unos pequeños pilares de hormigón armado. Este tipo de lámina creta es idóneo para profundizar y desmenuzar los secretos que alberga el paraboloide hiperbólico. Quizá no sea la mayor proeza estructural, en cuanto a láminas se refiere, ni la más espectacular, pero seguro es una de las formas más puras; y con pureza no refiero exclusivamente a aquella formal, sino conceptual.

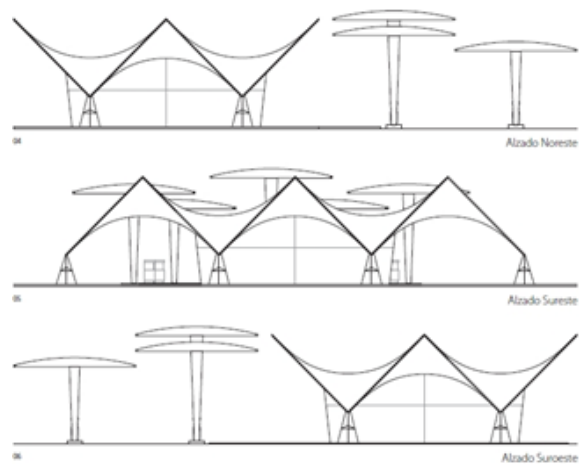


Figura 16. Alzados El Rebollet

Haro Piñar aplicó aquí el principio candeliano de “geometría como estructura”: la forma curvada no era capricho formal, sino necesidad técnica. La doble curvatura de cada paraboloide garantizaba su estabilidad mediante pura tensión superficial, eliminando la necesidad de vigas o arcos adicionales. El hormigón armado se comportaba como un material textil, tensado en el espacio. Socialmente, la gasolinera representaba un raro ejemplo de democratización de la buena arquitectura. Mientras otros arquitectos reservaban sus hitos estructurales para iglesias o pabellones de elite, aquí la excelencia técnica se ponía al servicio de una infraestructura popular.

Es un ejemplo aislado, estas formas sinuosas dificultaban su ejecución, por ello y por su complejidad técnica es que no observamos excesivos casos de estas estructuras. Era necesario una mano de obra muy cualificada, cosa que ahora escasea; solían producirse fisuraciones y problemas de pandeo debido

a cálculos mal ejecutados o a problemas con la precisión exigida para su construcción; y debido a su compleja y escultórica forma era inviable generar una prefabricación óptima y adaptarla a la producción en serie, cosa que mermaba su presencia frente al coloso industrial.

Lamentablemente, esta gasolinera y referente formal, se encuentra actualmente acorralada por edificios masivos propios del boom del ladrillo; y el edificio metálico, que funcionaba como restaurante, está prácticamente derruido. La industrialización, en los años dorados de las estructuras laminares, surgió como una fuerza antagónica.



Figura 17. Decadencia del restaurante El Rebollet

Sus principios de estandarización y producción masiva acapararon la atención frente a la artesanía exigida por los encofrados complejos, la construcción in situ y los cálculos manuales que demandaban estas formas libres. Mientras la cadena de montaje servía como norma para la construcción moderna de piezas idénticas -sin alma- las láminas se hundían aferrándose a su singularidad geométrica.

Esto las condenó a considerarse como obras de museo, admirables, pero inviables en un mundo que prioriza la velocidad y economía sobre la poesía estructural.

Hoy las tornas han cambiado, ese mismo paradigma industrial se ha convertido en cómplice. La fabricación digital, heredera de la producción en serie pero alimentada por algoritmos, convierte siluetas complejas en instrucciones sencillas, y, gracias a softwares paramétricos, en piezas extremadamente eficientes; la mano de obra artesanal ha mutado, de manera colaborativa -por ahora- a mano de obra robótica, capaz de cortar y montar piezas sinuosas con una precisión milimétrica; y el material, gracias a los bosques certificados y a la concienciación medioambiental -la madera laminada- ha logrado rebatir al hormigón.

Esta inversión histórica es la oportunidad para reconciliar el esplendor estructural del siglo XX con las capacidades y necesidades del siglo XXI.

El Rebollet, discretamente, puede albergar los secretos para esa reconciliación



Figura 18. Cubierta paraboloides hiperbólicos El Rebollet

1.2 ¿Cómo Recuperar las Láminas sin Repetir los Errores?

La arquitectura se debate eternamente entre la visión y la materialización. Recuperar las estructuras laminares históricas implica un ejercicio de honestidad intelectual: reconocer que admirar las obras del pasado no basta si no somos capaces de superar sus limitaciones con los recursos de nuestro tiempo. Este desafío trasciende lo técnico para convertirse en una cuestión ética sobre cómo construimos, para quién y con qué consecuencias.

- El primer interrogante nos confronta con la herencia material del siglo XX. El hormigón armado, aunque revolucionario en su época, representa hoy un problema ambiental: su huella de carbono resulta incompatible con la urgencia climática actual.
- El segundo desafío es de eficiencia del proceso constructivo. Los complejos encofrados que requerían las formas libres de antaño representaban un desperdicio material inaceptable a día de hoy.
- El tercer frente es la democratización espacial. La belleza estructural no puede seguir siendo privilegio de unos pocos. Se trata de crear arquitectura que sirva a las comunidades, no a egos individuales.

Estas preguntas no son meramente técnicas sino morales.

Reflejan una elección entre repetir métodos conocidos o abrir nuevos caminos. Entre la comodidad de lo establecido y el riesgo de lo innovador. Este trabajo no pretende agotar las respuestas, sino plantear las preguntas correctas. Entrever que otra arquitectura es posible, cuando unimos belleza estructural con justicia social.

Al final, se trata de honrar el legado de los maestros modernos no repitiendo sus formas, sino adoptando su espíritu innovador. Nuestra tarea es aplicar esa misma actitud crítica a los desafíos de nuestro tiempo.

Evidentemente, al ser un mero alumno, tener los conocimientos y recursos justos, y tratarse de un trabajo académico, hay incógnitas y procesos que no soy capaz de abordar, por lo que este trabajo pretende plantearse como una base hipotética superficial de una propuesta proyectual que, con los recursos y el equipo necesario, podría llegar a desarrollarse correctamente.

Dicho esto, la pregunta es: ¿cómo?.

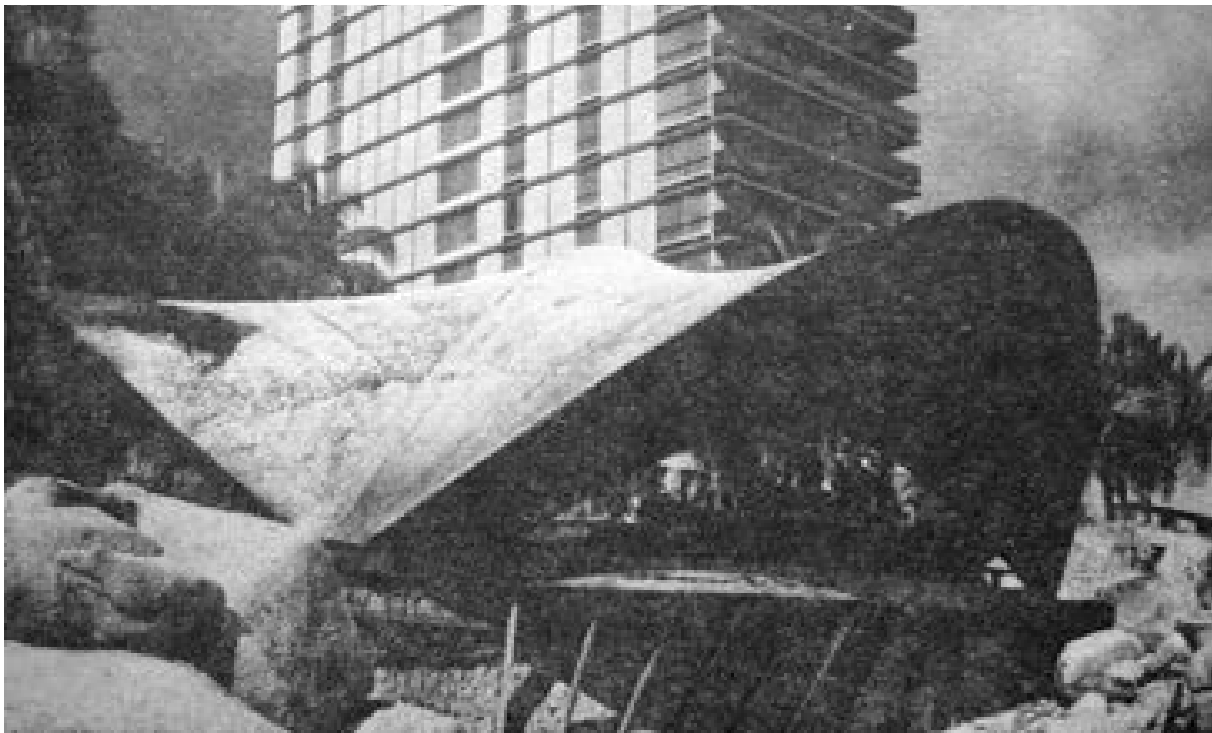


Figura 19. Cabaret La Jacaranda, Acapulco, México. Félix Candela

2

LA CURVA QUE TRANSCIENDE ERAS

La historia de las estructuras laminares podría comprenderse como un diálogo entre intuición geométrica y precisión material. Félix Candela, con su dominio de la forma pura, y Achim Menges, con su revolución digital, representan dos faros que, complementándose, proyectan una luz que sugiere una vía prometedora: rescatar la elegancia estructural del siglo XX gracias a la tecnología y sostenibilidad del siglo XXI.

2.1 Félix Candela: Revolución Geométrica en el Hormigón⁸

Félix Candela (1910-1997) fue mucho más que un arquitecto o ingeniero: fue un pionero de la forma y la materia, un visionario que transformó el hormigón en poesía estructural. Su vida, marcada por el exilio y la reinención, refleja la resiliencia de quien convierte las adversidades en oportunidades creativas. Nacido en Madrid y formado en la Escuela Superior de Arquitectura, su carrera se truncó abruptamente con la Guerra Civil española, obligándolo a exiliarse en México en 1939. Este giro fortuito lo llevó a un país en pleno desarrollo económico mexicano, donde su talento encontró el terreno fértil para florecer.

Candela encarnó la fusión entre arte y ciencia, difuminando los límites entre la arquitectura y la ingeniería. Sus estructuras, conocidas como láminas, no eran meras cubiertas, sino esculturas funcionales donde la geometría se convertía en el principal elemento estructural. Como él mismo afirmaba, “no se puede imaginar una forma sin una estructura, ni una estructura sin una forma”. Su obsesión por la eficiencia material lo llevó a dominar el paraboloides hiperbólico, una superficie de doble curvatura que permite cubrir grandes luces con espesores increíblemente delgados, desafiando la gravedad con elegancia.



Figura 20. Retrato Félix Candela

Candela transformó el exilio en un laboratorio de formas libres: su genio fue simplificar la complejidad

Pese que su obra es muy extensa y sigue una línea evolutiva bastante coherente se pueden distinguir varias etapas creativas a lo largo de la carrera del arquitecto:

Exilio y Adaptación (1939-1950)

Tras llegar a México, Candela inició un proceso de adaptación que culminó con la fundación de la empresa Cubiertas Ala en 1950. Sus primeros proyectos incluyeron hoteles en Acapulco y estructuras experimentales, donde comenzó a explorar el potencial del hormigón armado.

Experimentación y Revolución Estructural (1951-1960)

Esta década marcó su consagración. El Pabellón de Rayos Cósmicos (1951) fue su primer hito: una delgada lámina de hormigón de 1.5 cm de espesor que resolvía las exigentes necesidades científicas del proyecto. Aquí perfeccionó el uso del paraboloide hiperbólico, demostrando que la geometría podía suplir la masa. Obras como la Iglesia de la Medalla Milagrosa (1953) y el Restaurante Los Manantiales (1958) consolidaron su lenguaje característico: formas orgánicas, eficiencia material y luz natural como elemento compositivo.



Figura 21. Restaurante Los Manantiales

Madurez y Reconocimiento Internacional (1961-1970)

Esta fue la más fructífera y se caracteriza por la materialización de sus estructuras laminares con máxima depuración formal y mayor producción del paraboloide hiperbólico, logro que supuso un enorme avance en la creación de estructuras de doble curvatura. Esta morfología le permitía resolver tres premisas principales: optimización económica gracias a la reducción del material necesario

para crear la forma, en este caso con el hormigón armado; facilitaba el cálculo de dichas estructuras gracias a los preceptos geométricos que las componen, simplificando la forma y el comportamiento estructural; y le posibilitaba alzar nuevas curvas, esculturas estructurales con una belleza intrínseca que solo elementos provenientes de la naturaleza albergan. Proyectos como el Palacio de los Deportes para los Juegos Olímpicos de México 1968 y las estaciones del Metro de la Ciudad de México evidenciaron su capacidad para escalar soluciones estructurales a programas complejos.



Figura 22. Estación metro San Lázaro

Legado y Trascendencia (1971-1997)

Tras mudarse a Estados Unidos en 1971, se dedicó a la docencia y al diseño de proyectos internacionales, como el Oceanográfico de Valencia (2003), su última obra maestra. Su legado pervivió en arquitectos como Santiago Calatrava y Zaha Hadid, quienes adoptaron su principio de que “la forma es estructura”.



Figura 23. Oceanográfico de Valencia

La inmensa mayoría de sus obras -por no decir la totalidad- son dignas de estudio y suponen un dominio de los conocimientos técnicos y conceptuales supinos.

Sin embargo, para el proyecto que nos atañe, centraremos el foco en el paraboloide hiperbólico, concretamente de planta cuadrada, cuyas propiedades, como hemos sugerido previamente, albergan un potencial de reinterpretación digno de remarcar.

El Paraboloide hiperbólico surge de, a lo largo de una parábola cóncava dividida en segmentos iguales, generar otra serie de parábolas convexas con sus vértices como “perchas” de los diferentes segmentos de la parábola generatriz. En el caso concreto del PH de planta cuadrada, surge de la división simultánea e igual de las aristas opuestas del cuadrado base, su unión en forma de retícula y la elevación de dos de sus vértices a lo largo de una diagonal.

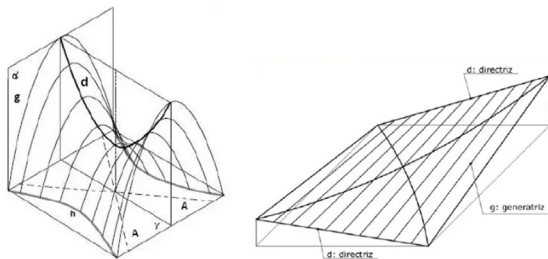


Figura 24. Diferentes representaciones PH

Una de las singularidades, y propiedades intrínsecas de esta forma, que le otorga tal resistencia, es la doble curvatura de la superficie, considerada como una de aquellas construcciones que utiliza de la forma más eficiente el material, puesto que actúa exclusivamente con esfuerzos de tracción y compresión, en forma de membrana, paralelos a la superficie; esto no solo elimina los momentos flectores, sino que permite utilizar el material estrictamente necesario para resistir estos esfuerzos que, al ser una lámina tan delgada y eficiente, suelen ser mínimos.

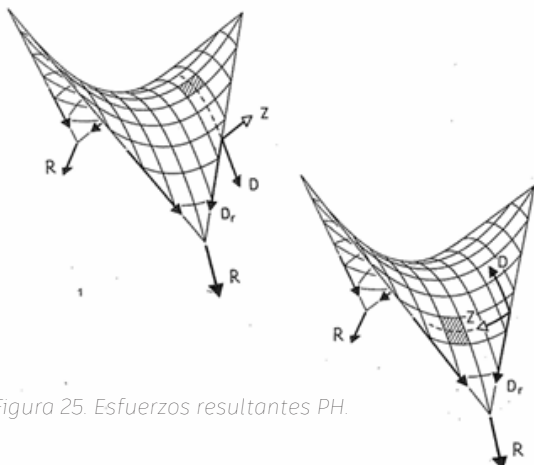


Figura 25. Esfuerzos resultantes PH.

La propia base del Paraboloide Hiperbólico, concretamente de planta cuadrada, se genera a partir de una planta cuadrangular reticulada, una malla ortogonal adscrita a las coordenadas cartesianas que permite la subdivisión en módulos regulares. Esta base cuadriculada, aupada sobre el concepto de la modulación industrializada, suscita un interés notorio, pues sugiere una posibilidad -por ahora hipotética,- de plantear una serie de piezas modulares de base cuadrada que interactúen entre sí.

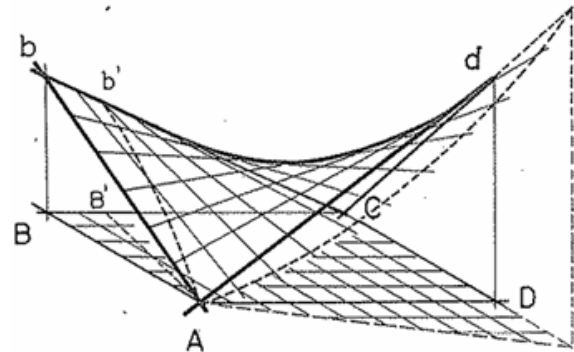


Figura 26. Superficie reticular PH.

Es más, esta retícula es el soporte conceptual para su capacidad fractal, permite replicar dicha geometría a diferentes escalas, únicamente variando la dimensión de la retícula cuadrangular y ajustando el grosor de la lámina resultante según luz y esfuerzos.

El PH presenta una propiedad conocida como “superficie reglada” que supone una ventaja notable para la fabricación de dichas láminas; esto permite generar la superficie hiperbólica-compuesta por dos parábolas opuestas-únicamente con rectas, hecho que facilita enormemente la construcción del encofrado y de la malla electrosoldada embebida en el hormigón.

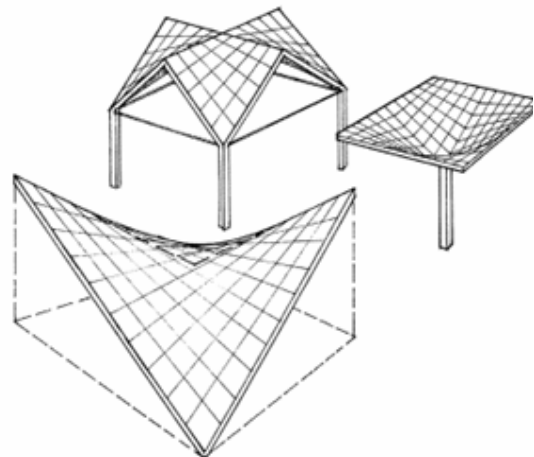


Figura 27. Variaciones formales PH.

El encofrado, al poder generarse con líneas rectas, permite el uso de listones de madera, hecho que no sólo simplifica la construcción, sino que optimiza y abarata el propio encofrado; pese a esto, la cantidad de soportes necesarios para aguantar toda la estructura y la madera empleada, en determinados proyectos, acabó costando más que la propia lámina de hormigón, para luego desmontarse y desecharse. Este componente -el encofrado- ha sido un rompecabezas para estas estructuras, no sólo por la cantidad de material irrecuperable, sino por su elevado coste.

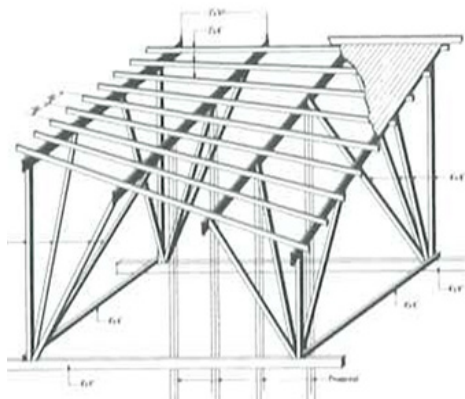


Figura 28. Encofrado superficie reglada

Por último, la propia forma del PH presenta, gracias a su naturaleza en planta, una simetría cuádruple; esto permite que las fuerzas

horizontales se anulen, transmitiéndose únicamente verticales, cosa que facilita enormemente el trabajo con estas formas, dado que elimina la necesidad de arriostrados o contrafuertes y reduce la cimentación a apoyos puntuales en vértices inferiores.⁹

La forma es estructura: La geometría libera al material de su peso muerto.

Esta sentencia sintetiza la revolución de candela como un principio físico-matemático donde la geometría asume la función estética y estructural.

Esta visión transformó la masa inerte, aquella innecesaria y sobredimensionada de las estructuras convencionales -útil pero optimizable según las distribuciones real de tensiones de la pieza- en piel activa, liberando edificios del material innecesario mediante el entendimiento de la curvatura.

Su genio residió en comprender que la eficiencia estructural debía ser el núcleo de la belleza formal.

Si tuviésemos que resaltar tres conceptos que definiesen su legado serían: la desmaterialización, construyendo el máximo con el mínimo; la democratización espacial, ensalzando obras y espacios comunes con sus esculturas estructurales; y la flexibilidad formal, adaptándose a cualquier espacio con una planta libre y multifuncional.

TABLA CARACTERÍSTICAS

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN FUNCIONAL	RELEVANCIA PARA LA INVESTIGACIÓN
PLANTA CUADRADA	Reticular y apoyo en dos vértices	Permite subdivisión en cuadrícula (Ej. módulos de 2x2m)
SIMETRÍA RADIAL	Doble eje de simetría Anula esfuerzos horizontales	Elimina necesidad de contrafuertes o arriostrados
ESTRUCTURA REGLADA	Superficies generadas por rectas entre dos parábolas opuestas	Facilita fabricación digital
COMPORTAMIENTO	Esfuerzos de membrana puros: Compresión dirección convexa, tracción en cóncava	Optimiza material (espesor mínimo)
POTENCIA MODULAR	Planta reticulada y cada cuarto de Paraboloide es autosimilar.	Base para sistema fractal

Figura 29. Imagen del autor. Tabla 1. Características PH

2.2 Achim Menges: Revolución digital-material

Achim Menges (1975) es un arquitecto y profesor alemán que ha redefinido la innovación arquitectónica mediante la integración de tres campos clave: computación avanzada, principios biológicos y fabricación robótica. Como director fundador del Institute for Computational Design and Construction (ICD) de la Universidad de Stuttgart, su trabajo trasciende la experimentación formal para revolucionar el uso de los materiales en arquitectura.



Figura 30. Retrato Achim Menges

Además de trabajar con madera laminada, Menges investiga con compuestos innovadores como fibras de carbono, vidrio y biopolímeros, partiendo de una premisa fundamental: los materiales son sistemas activos con capacidades propias, no meros elementos pasivos portantes. Su enfoque se centra en aprovechar estas propiedades mediante procesos computacionales y robóticos, transformando materiales convencionales en estructuras de alta eficiencia. Galardonado con el prestigioso Premio Gottfried Wilhelm Leibniz 2023, Menges ha demostrado cómo la precisión técnica puede ser la base de la sostenibilidad.

Proyectos como el HygroShell (2023) y el BUGA Wood Pavilion (2019) ejemplifican su enfoque: prototipos a escala real que aplican principios biomiméticos para crear arquitectura ligera y circular. Menges enfatiza la colaboración interdisciplinaria con ingenieros, biólogos y científicos de materiales, abordando desafíos globales. Su investigación propone un cambio paradigmático hacia una arquitectura ética, donde la tecnología digital potencia las propiedades de los sistemas naturales.¹⁰

Los pabellones de madera laminada desarrollados en Stuttgart no son simples estructuras, sino prototipos de investigación que exploran nuevos paradigmas constructivos. Demuestran cómo puede lograrse una arquitectura compleja, eficiente y sostenible mediante la sinergia entre principios naturales y tecnología digital, haciendo tangible el potencial de una construcción más responsable con el planeta.

ICD/ITKE Research Pavilion 2011

Este primer pabellón investigó la aplicación de principios estructurales biológicos a la arquitectura y constituye un referente en la exploración arquitectónica de sistemas biomiméticos y fabricación digital avanzada. El proyecto se inspira en la morfología del erizo de mar, cuyo esqueleto está formado por placas poligonales unidas mediante conexiones fibrosas. Esta lógica natural fue traducida al sistema constructivo empleando placas de contrachapado de abedul de tan solo 6,5 mm de espesor, ensambladas mediante uniones dentadas capaces de transmitir los esfuerzos de la superficie sin necesidad de elementos metálicos complejos.



Figura 31. Imagen aérea Research Pavilion 2011

La estrategia se basó en tres principios biomiméticos fundamentales: heterogeneidad, variación del tamaño de las células según la curvatura y el análisis computacional; anisotropía, orientación de las placas de acuerdo con las direcciones de carga estructurales; y jerarquía, donde cada nivel

constructivo, de las piezas al conjunto, responde a un sistema de ensamblaje modular y adaptable. Estas propiedades, extraídas del modelo biológico, definen la eficiencia y la flexibilidad de la estructura.



Figura 32. Imagen interior Research Pavilion 2011

El proceso de diseño integró diseño computacional, simulaciones estructurales y fabricación robótica. Gracias a este flujo se produjeron más de 850 componentes únicos y 100 000 uniones dentadas de alta precisión. Este procedimiento no solo garantizó exactitud y eficiencia material, sino que permitió un sistema de montaje rápido y colaborativo, realizado en el campus por estudiantes e investigadores, demostrando el potencial de la fabricación digital para crear estructuras ligeras, adaptativas y sostenibles inspiradas en sistemas naturales.¹¹



Figura 33. Detalle juntas Research Pavilion 2011



Figura 34. Vista exterior cubierta, Research Pavilion 2011

Landesgartenschau Exhibition Hall, 2014

Construido para la Exposición Estatal de Jardinería en Schwäbisch Gmünd, este pabellón representó la evolución natural de las investigaciones iniciadas en 2011. El proyecto perfeccionó el concepto basado en el esqueleto del erizo de mar, aplicándolo a un sistema estructural integral que funcionaba simultáneamente como cubierta y cerramiento, alcanzando una eficiencia material excepcional.



Figura 35. Imagen exterior pabellón Expo 2014

La estructura se compuso de 243 placas de contrachapado de haya de 50 mm de espesor, material local poco utilizado hasta entonces en aplicaciones estructurales. Cada placa presentaba una geometría única, fabricada robóticamente con 7.600 uniones de cola de milano en sus bordes que garantizaban la estabilidad estructural mediante un entrelazado tridimensional preciso tipo mecano, eliminando la necesidad de elementos portantes adicionales.

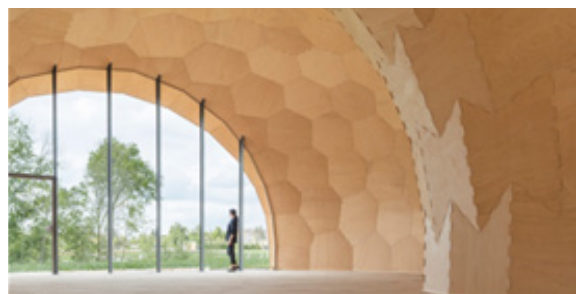


Figura 36. Imagen interior pabellón Expo 2014

El proyecto demostró una eficiencia notable: la estructura de 245 m², cubriendo una superficie en planta de 125 m², se prefabricó en 3 semanas y se montó in situ en 4 semanas, utilizando solo 12 m³ de madera. Casi la totalidad de los residuos de fabricación se reutilizaron para producir parquet, alcanzando una tasa de desperdicio cercana a cero.

Fue el primer edificio del mundo con una estructura primaria realizada completamente con placas de madera fabricadas robóticamente. Validó la viabilidad arquitectónica de un sistema completo de placas que funciona simultáneamente como estructura, envolvente y acabado interior, todo ello con una eficiencia material admirable, estableciendo nuevos estándares en arquitectura.¹²



Figura 37. Detalle juntas pabellón Expo 2014

ICD/ITKE Research Pavilion 2016

Este pabellón representó un avance significativo en la exploración de la interpretación material inspirada en sistemas biológicos. Basándose en el estudio de equinodermos, investigó cómo sus exoesqueletos optimizan el material mediante variaciones de espesor y orientación fibrilar en respuesta a tensiones locales. El objetivo arquitectónico fue crear una estructura laminar que funcionara como un “tejido” continuo donde la orientación de las fibras de madera se alinea con las trayectorias de carga principales.



Figura 38. Imagen exterior Research Pavilion 2016

Con una superficie de 85 m² y un peso de solo 780 kg -7.85kg/m²- la estructura se compuso de 151 segmentos únicos de contrachapado de haya. La combinación de curvatura elástica y costura robótica permitió lograr una relación espesor-luz excepcional de 1/1000. Cada componente fue optimizado computacionalmente mediante análisis

de elementos finitos (FEM) para alinear la anisotropía de la madera con los patrones estructurales, simulando principios biológicos de eficiencia material.



Figura 39. Imagen montaje Research Pavilion 2016

La innovación principal consistió en la implementación pionera de costura robótica a escala arquitectónica como sistema de ensamblaje, eliminando completamente las uniones metálicas. Este enfoque, complementado con membranas textiles como elementos de conexión, reprodujo el comportamiento fibroso observado en organismos naturales. El proyecto estableció un flujo de trabajo digital que vinculaba diseño computacional, análisis estructural y fabricación robótica, demostrando el potencial de la personalización en masa en arquitectura de madera mediante la colocación precisa de material.¹³

BUGA Wood Pavilion 2019

Este pabellón, construido para la Exposición Federal de Horticultura (BUGA) en Heilbronn, representa el resultado de una década de investigación y su aplicación a escala arquitectónica completa. Sintetiza principios de eficiencia estructural inspirados en sistemas biológicos con la viabilidad constructiva real, creando un espacio público permanente y desmontable.



Figura 40. Imagen exterior Wood Pavilion 2019

La cubierta, de 600 m², cubriendo una superficie en planta de aproximadamente 500m² y un vano libre de 30 metros, se conforma a partir de 376 segmentos huecos de madera, diseñados como cajas poliédricas de placas delgadas unidas por anillos perimetrales de mayor grosor, creando una teselación de módulos hexagonales portantes que le otorgan resistencia al pabellón.

Este sistema permitió reducir el peso estructural a solo 36 kg/m², alcanzando una eficiencia inédita en relación con su escala. El diseño computacional generó cada componente como pieza única, optimizada digitalmente según su posición y solicitud estructural. El proceso de fabricación introdujo un hito tecnológico: una plataforma robótica móvil, capaz de ensamblar, encolar, clavar y fresar uniones con una precisión de 300 micras.



Figura 41. Imagen interior Wood Pavilion 2019

Esta automatización garantizó rapidez y exactitud: cada elemento se producía en menos de una hora y el montaje en obra, sin necesidad de encofrados ni andamiajes complejos, se completó en 10 días. Además, la estructura fue concebida para ser desmontada y reutilizada, destacando su visión sostenible. El diseño se optimizó algorítmicamente para formar todas las planchas de madera, minimizando los residuos de corte a menos del 7%.



Figura 42. Proceso montaje Wood Pavilion 2019

Redució el material utilizado en un 40% comparado con sistemas laminares tradicionales y validó que la precisión digital permite una libertad formal radical sin sacrificar la sostenibilidad ni la economía. Es el eslabón directo entre la investigación de Menges y el objetivo de este TFG sobre paraboloides hiperbólicos modulares.¹⁴



Figura 43. Módulos en fábrica, Wood Pavilion 2019



LivMats Biomimetic Shell 2023

Este proyecto representa la culminación de más de una década de investigación en la Universidad de Stuttgart, encarnando la madurez total de un nuevo paradigma arquitectónico. Lejos de ser un simple prototipo, se alza como un manifiesto material que vira de la arquitectura como objeto estático hacia la arquitectura como espacio con vida.



Figura 44. Imagen exterior Pabellón 2023

La propuesta se fundamenta en una doble biomímesis: por un lado, adopta la microestructura de los artrópodos, donde las fibras se orientan según los esfuerzos estructurales; por otro, emula los mecanismos higromórficos de las plantas, que responden a estímulos ambientales sin consumo energético. Cúlmen conceptual, establece como principio de diseño fundamental: la forma como consecuencia, no como objetivo.

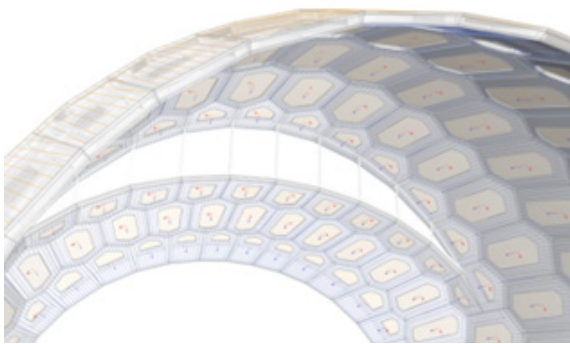


Figura 45. Diagrama tensiones Pabellón 2023

Mediante algoritmos genéticos y simulaciones de Elementos Finitos acopladas a modelos higro-térmicos, el equipo pudo programar digitalmente el comportamiento de la madera. El software procesó miles de configuraciones geométricas y de orientación fibrilar, evolucionando hacia una solución donde la forma, la estructura y la respuesta ambiental eran indisociables. Cada una de las piezas que compone el caparazón es única.

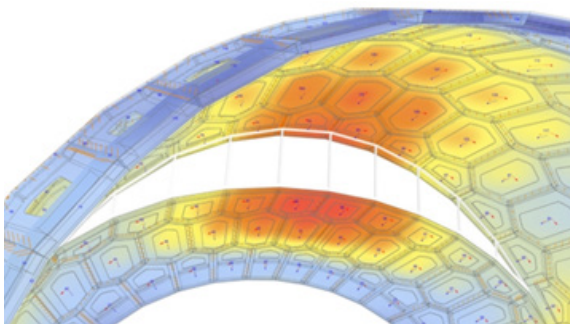


Figura 46. Diagrama solicitaciones Pabellón 2023

En este proyecto podemos observar la cúspide de la fabricación robótica colaborativa. En este caso, un brazo robótico, acoplado sobre una cadena de montaje, no era una simple herramienta de corte, era una extensión física del modelo digital. Escaneaba la veta de cada tablero para ajustar en tiempo real la estrategia de corte, alineando la orientación de las fibras con las trayectorias de carga principales identificadas en la simulación. La tolerancia alcanzada, de $\pm 0.1\text{mm}$, sienta las bases para el siguiente acto revolucionario: el ensamblaje sin andamios.

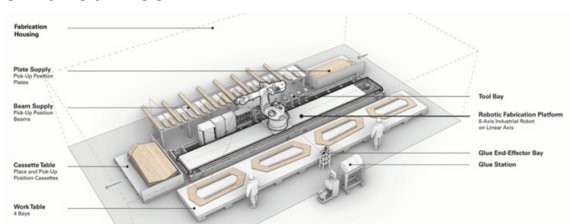


Figura 47. Robot colaborativo para Pabellón 2023

Este alarde colaborativo no se reduce al proceso de fabricación de los módulos; para el montaje propio del pabellón se emplearon dos robots arácnidos guiados por visión artificial con apliques tipo grúa y cabezales capaces de: reconocer cada pieza, corroborar con el software la posición y dirección, desplazar y ensamblar con precisión milimétrica, y atornillar y asegurar la cohesión del conjunto. Toda una exhibición computacional, algorítmica y robótica que demuestra la viabilidad de la morfología compleja modular de manera económica, rápida y sostenible.

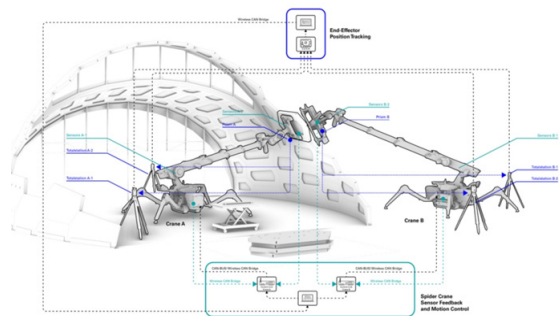


Figura 48. Robots montaje para Pabellón 2023

La innovación más radical, sin embargo, reside en la naturaleza de las propias piezas. Se trata de componentes de madera programables higro-térmicamente. Mediante un conocimiento profundo de la anisotropía y la higroscopicidad de la madera, los investigadores programaron láminas delgadas de abeto (de apenas 2 mm) para que se curvaran a voluntad al absorber humedad ambiental. Esta curvatura no es aleatoria; se calcula mediante una ecuación que considera el espesor, el ángulo de la fibra y el coeficiente de hinchazón del material. Así, estas piezas actúan como músculos naturales: se colocaron en estado húmedo y, al secarse, indujeron tensiones precisas en cada pieza, actuando como un sistema de auto-tensado y auto-bloqueo que reacciona según la luz y el ambiente.



Figura 49. Hojas tensadas higro-térmicamente

Los logros son extraordinarios: una tasa de residuos inferior al 2%, permitiendo reutilizar el resto, aproximándolo a 0%; una eficiencia material que permite lograr luces de 16m pesando solo 27 kg/m²; y una huella de carbono negativa al almacenar CO₂.

Pero su verdadero legado es conceptual: demuestra que la precisión digital es el medio para liberar el potencial intrínseco de los materiales naturales.

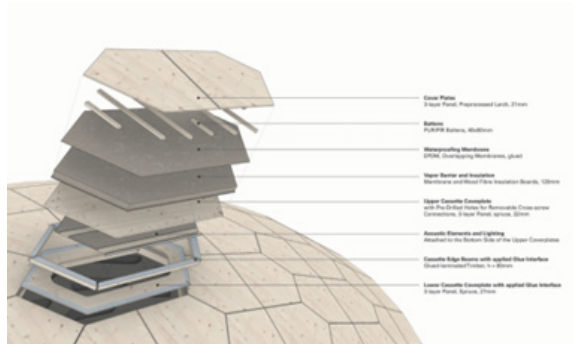


Figura 50. Esquema constructivo Pabellón 2023

Este pabellón es la piedra angular que conecta el legado morfológico de Candela con el futuro de la construcción. Candela dominó la geometría del paraboloide hiperbólico con hormigón armado; hoy, Menges y su equipo nos muestran que puede lograrse con madera, no como un material inerte, sino como un elemento vivo. Este proyecto es la prueba definitiva de que la hipótesis de reinterpretar el paraboloide hiperbólico es altamente viable: los “encontrados vivos”, estructuras sociales, sostenibles y económicas, son el siguiente capítulo en la historia de las estructuras laminares.¹⁵



Figura 51. Imagen interior Pabellón 2023

Conclusiones y Principios de Menges¹⁶

El trabajo desarrollado por Achim Menges y su equipo en la Universidad de Stuttgart representa uno de los aportes más significativos a la arquitectura reciente, no solo por su innovación tecnológica, sino por constituir un marco conceptual completo que replantea la relación entre diseño, materia y entorno. Tras analizar su trayectoria, es posible identificar cinco principios fundamentales que, en conjunto, trazan un nuevo camino para el proyecto arquitectónico.

En primer lugar, Menges propone entender la computación como base generativa, superando la idea del software únicamente como herramienta de representación. A través de algoritmos que generan formas digitalmente, se emulan procesos naturales de crecimiento y adaptación, permitiendo que la forma arquitectónica surja de manera orgánica a partir de condicionantes estructurales, ambientales y materiales.

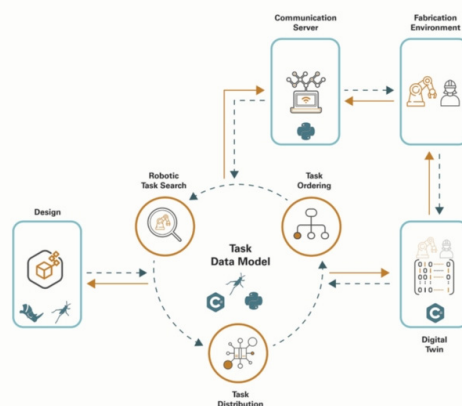


Figura 52. Diagrama relaciones computacionales

En segundo lugar, su trabajo demuestra que la fabricación robótica es el medio necesario para materializar con precisión las complejidades del diseño computacional. La capacidad de producir componentes únicos con tolerancias milimétricas hace viable económicamente la personalización a escala arquitectónica, eliminando desperdicios y reduciendo errores.

El tercer principio, quizás el más revolucionario, consiste en entender la materia como un sistema activo y no como un soporte inerte. Proyectos como el pabellón de madera higroscópica muestran cómo los comportamientos tradicionalmente considerados problemáticos -como la deformación por humedad- pueden

transformarse en potencial proyectual. Esta aproximación convierte a los materiales en co-autores de diseño.

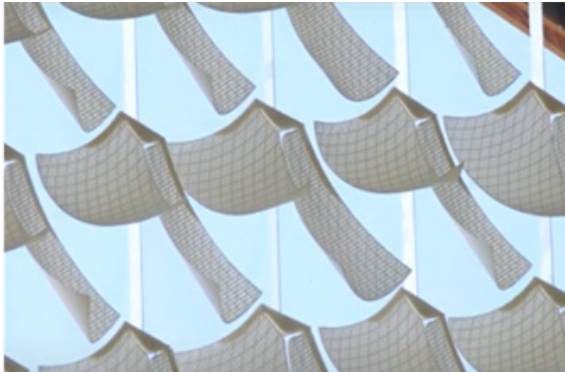


Figura 53. Comportamiento higratérmico celosía

Esto conduce al cuarto principio: la eficiencia como consecuencia de un sistema común, donde diseño, fabricación y comportamiento material se gestan conjuntamente. La reducción de residuos por debajo del 2% y la optimización están incorporadas en la lógica misma del proceso desde su comienzo.

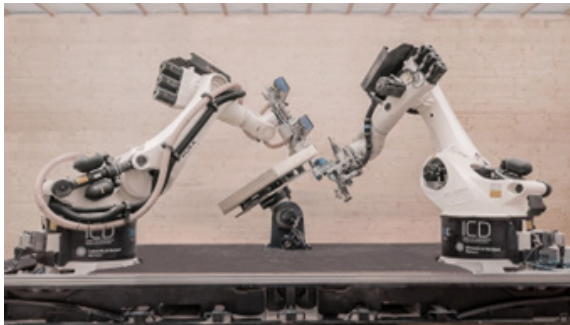


Figura 54. Robots de montaje modular

Finalmente, Menges desarrolla una biomímesis de principios y no de formas, trasladando a la arquitectura estrategias de optimización y adaptación de sistemas naturales, sin caer en un mimetismo formal superficial. Sus estructuras no imitan la apariencia de organismos naturales, sino que operan bajo sus mismas lógicas de funcionamiento.

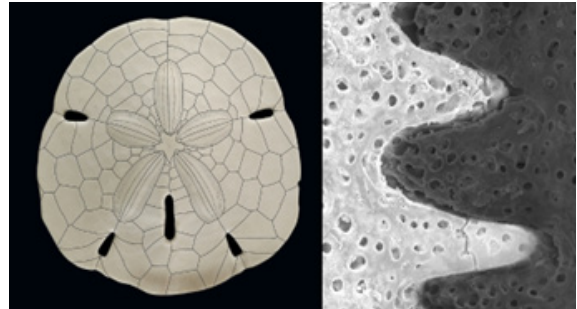


Figura 55. Estudio morfología para mimetismo

En conclusión, el legado de Menges proporciona el marco teórico y técnico que permite reinterpretar tradiciones estructurales previas -como la de Félix Candela- con herramientas contemporáneas. Su obra demuestra que es posible conciliar complejidad formal, eficiencia material y responsabilidad ambiental. Estos principios no solo representan avances tecnológicos, sino una nueva ética proyectual para nuestra era, donde la arquitectura pueda establecerse como un sistema en diálogo con su entorno.



Figura 56. Detalle celosía y cubierta Pabellón 2023

2.3 Fusión Candela-Menges: Sinergia de Eras

La osadía estructural de Félix Candela, expuesta elegantemente en las láminas de hormigón, encuentra en el siglo XXI su reinterpretación a través de la perspectiva digital y material de Achim Menges. Esta fusión no es una mera sustitución de materiales o técnicas, sino una sinergia conceptual que propone reescribir los principios del diseño laminar en la actualidad.

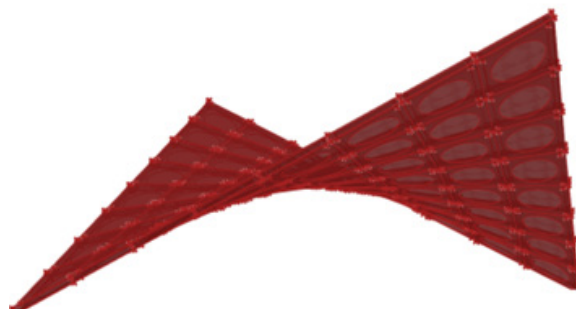


Figura 57. Imagen del autor. PH en Grasshopper

La fusión de estos dos universos aparentemente distantes permite extrapolar conceptos tecnológicos a los principios técnicos de antaño sustentándose en varios pilares:

La Geometría como Proceso Adaptativo:

El paraboloide hiperbólico (PH) de Candela nació de un cálculo intuitivo y una comprensión profunda de las superficies de doble curvatura y el comportamiento físico del hormigón. Hoy, ese mismo entendimiento se produce en modelos paramétricos y algoritmos inteligentes. La geometría hiperbólica ya no es solo una forma; es un sistema de interacciones formado por datos estructurales, ambientales y materiales.

Donde Candela veía una superficie resistente por definición geométrica, Menges ve un organismo estructural que ajusta su curvatura, espesor y patrón según análisis computacional, convirtiéndose en un organismo vivo que simula, optimiza y genera automáticamente las instrucciones de corte CNC para cada pieza única, con una precisión que hace posible lo que antes era inimaginable: un PH de madera compuesto por cientos de módulos distintos que encajan a la perfección.

La Materialidad como Acto Ético de Diseño:

El contraste material entre ambos enfoques revela una evolución profunda en la conciencia arquitectónica. Candela trabajó con el material de su época: el hormigón, cuya fabricación

implica altas emisiones de CO₂ y cuyo sistema requería de encofrados desechables, un despilfarro de material y energía. La fusión propone transitar hacia la madera laminada, un material estructural con balance de carbono negativo que almacena CO₂ en lugar de emitirlo.

Pero el salto no es solo ecológico; es performativo. La madera, en láminas delgadas, permite una prefabricación robótica de alta precisión que transforma el pesado proceso del hormigón armado en un sistema ligero, seco y reversible. El “encofrado” deja de ser un molde temporal para convertirse en la estructura definitiva, inteligente y sostenible con una capacidad de prefabricación extrema. Pero la verdadera innovación no se estanca en lo ecológico, sino que va un paso más allá para adentrarse en la preprogramación del comportamiento intrínseco del material: mediante el control de la orientación fibrilar y el tratamiento superficial, las láminas de madera adquieren memoria higrotérmica programada.

Así, el material que alza el edificio deja de comportarse como un componente portante inerte para convertirse en un elemento activo y vivo que define el conjunto.

De la Artesanía a la Robótica:

La famosa destreza constructiva de Candela encuentra su equivalente contemporáneo en la artesanía robótica de alta precisión. Los robots del ICD/ITKE no son meras herramientas de corte: son extensiones físicas del modelo digital, ejecutando instrucciones de fabricación con tolerancias de ± 0.1 mm.

Esta precisión hace económicamente viable la producción de cientos de componentes únicos, cada uno optimizado para su posición específica en el conjunto proyectual. Y aquí surge el concepto más audaz de la fusión: la curvatura natural higrotérmica.

Imaginemos piezas de madera laminada diseñadas no solo para encajar, sino programadas para curvarse de forma autónoma al exponerse a la humedad ambiental durante el montaje. Estas piezas, planas al ser cortadas, adoptarían su curvatura final in situ, tensionando el conjunto y actuando como un sistema de autoensamblaje, eliminando la necesidad de complejos andamios o tensores metálicos. El proceso culmina con protocolos de montaje aumentado, donde cada pieza

espera ocupar su posición mientras un brazo robótico las va ensamblando a través de la realidad aumentada.

Esta perspectiva transforma el edificio de objeto estático a sistema activo. Se trata de tomar la intuición estructural del pasado y potenciarla con las herramientas del presente para responder a los desafíos del futuro.

Se busca replicar la forma del PH, pero reinterpretando su principios: lograr la máxima resistencia con el mínimo material, pero añadiendo procesos de razonamiento paramétrico, innovación tecnológica y concienciación medioambiental.

¿Y si fuese posible? ¿Y si los elegantes hiperboloides de Candela renaciesen no como monumentos de hormigón, sino como piezas ligeras de madera?

La evidencia experimental demuestra que no solo es técnicamente viable, sino éticamente necesaria. Esta fusión trasciende lo tecnológico para volverse cultural.

Es el camino hacia el “encofrado vivo”, una estructura social, sostenible y profundamente bella que pertenece a su tiempo.

I believe we can rethink the way we can use many materials, especially how they are detailed, to express more clearly their engineering nature, and thereby find a new and interesting aesthetic.

-Peter Rice

Addis, B. (2001) *Creativity and Innovation: The Structural Engineer's Contribution to Design*. Architectural Press.



Figura 58. Vista exterior Wood Pavilion 2019

2.4 Análisis Comparativo: Hormigón vs. Madera Laminada¹⁷

La elección entre hormigón y madera laminada trasciende lo técnico para convertirse en una declaración de principios éticos y ambientales. Mientras el hormigón simbolizó el progreso del siglo XX, la madera laminada emerge como el material del siglo XXI: un recurso renovable, bajo en carbono y tecnológicamente avanzado que redefine nuestra relación con el entorno construido. Esta transición no solo es posible, sino urgentemente necesaria para enfrentar la crisis climática sin renunciar a la innovación estructural.

El Potencial de Cambio

El hormigón armado, material por excelencia de la modernidad, permitió hazañas estructurales como los paraboloides hiperbólicos de Candela. Sin embargo, su huella ambiental es insostenible: la producción de cemento representa aproximadamente el 8% de las emisiones globales de CO₂, consume ingentes cantidades de agua y es un material hostil. Frente a esto, la madera laminada ofrece un nuevo paradigma:

- **Carbono negativo:** Almacena hasta 1 tonelada de CO₂ por m³, transformando los edificios en elementos que colaboran con las plantas.
- **Prefabricación:** Reduce tiempos de montaje en un 70-80% y residuos hasta un 90%.
- **Ciclo de vida circular:** Es biodegradable, reutilizable y procede de bosques gestionados sosteniblemente.

Ventajas de la Madera Laminada

- **Eficiencia estructural y ligereza:** La relación resistencia/peso de la madera laminada es comparable al acero y hormigón, pero con solo 400 kg/m³ frente a 2.700 kg/m³ del hormigón. Esto permite cimentaciones más ligeras y menor impacto en el terreno.
- **Confort humano y bienestar:** La madera regula naturalmente la humedad y temperatura interior, creando ambientes saludables con menor necesidad de sistemas artificiales. Su calidez visual y acústica la hace idónea para espacios educativos, sanitarios y viviendas, favoreciendo el bienestar psicológico.
- **Adaptabilidad tecnológica:** Permite integración con diseño paramétrico y fabricación robótica, como demostró

Achim Menges con tolerancias de ± 0.1 mm. Además, no es necesario que sea un edificio exclusivamente de madera, este material es compatible con sistemas híbridos (ej.: núcleos de hormigón para estabilidad sísmica), optimizando lo mejor de ambos materiales.

Limitaciones y Desafíos Futuros

- **Percepción cultural y normativa:** Persisten mitos sobre su resistencia al fuego y durabilidad, considerándose un material sensible y débil, aunque se ha demostrado que puede alcanzar clasificaciones REI 90 (90 minutos de resistencia al fuego).
- **Coste inicial y cadena de suministro:** El precio por m² puede ser un 10-20% superior al hormigón, aunque se compensa con ahorros en tiempo, mano de obra y reducción de residuos; no sólo hay que considerar lo económico, sino la consecuencia humana.
- **Humedad y mantenimiento:** Dado que es un material que interactúa con el entorno requiere de protecciones superficiales (ej.: aceites vegetales o pinturas minerales) en ambientes muy húmedos, con revisiones decadalmente.



Figura 59. Imagen chimeneas industriales

La transición del hormigón a la madera laminada supone un imperativo ético de nuestra era. Los datos son determinantes: la madera estructural supera al hormigón en eficiencia material, beneficios ambientales y bienestar humano, con un coste global significativamente menor.

La cuestión ya no es la necesidad del cambio, sino la urgencia de implementarlo. Cada estructura en madera representa un paso hacia una arquitectura que regenera en lugar de degradar, conecta en lugar de imponer, y responde conscientemente a los desafíos socioambientales de nuestro tiempo.

El legado estructural de Candela no se traiciona al abandonar el hormigón, sino que se honra reinventando sus principios mediante los materiales contemporáneos. Sus paraboloides hiperbólicos pueden renacer en madera laminada: más ligeros, inteligentes y humanos.

Tabla desempeño

Parámetro	Lámina de hormigón (1960s)	Lámina de madera (Menges)	Cambio (%)
Huella carbono	+450 kg CO ₂ /m ²	-160 kg CO ₂ /m ² (almacenado)	-140%
Coste total/m ²	300-600€/m ²	330-720€/m ²	+10 a +20%
Tiempo montaje	6-8 meses	2-4 semanas	-90%
Vida útil	50-100 años	50-100 años (reparable/reciclable)	Indeterminado*1
Residuos obra	30-40%	<5% (optimizado CNC)	-85%
Escalabilidad	Proyectos únicos	Sistema fractal modular PH x Número	Indeterminado*2
Peso (kg/m ²)	275	38	-80%

*1 Si se considera el reciclaje como nueva vida

*2 Un solo paraboloide cubre (5x5m a 20x20m) – cada pabellón cuenta con 4 paraboloides solapados (hasta 40x40m = 1600 m²), posibilidad “ilimitada” uniendo indeterminados PH

Estos datos pueden verse alterados según ondulaciones del mercado de valores y características de la madera según especie.

Figura 60. Imagen del autor. Tabla 2. Comparativa Hormigón vs. Madera

2.5 Paraboloides Hiperbólicos de Madera s.XX¹⁸

En la Europa de posguerra, surgió una tímida pregunta que desafiaba el proceso constructivo de la época: si la madera era capaz de servir de encofrado para las complejas formas del hormigón, ¿por qué no podía convertirse ella misma en estructura definitiva? Esta reflexión impulsó una serie de experimentos que buscaban reinterpretar las estructuras laminares con un material más humano y sostenible que el hormigón armado.

En 1963, la Universidad de Stuttgart se convirtió en un núcleo de exploración. Franz Krauss, Curt Siegel y Fritz Leonhardt demostraron que los paraboloides hiperbólicos podían construirse con simple tabloncillo de madera, aprovechando su naturaleza reglada -forma construible mediante rectas- para crear superficies complejas con medios sencillos. Su prototipo de dos paraboloides entrelazados era a la vez elegante y eficiente, una prueba tangible de que la madera podía alcanzar la sofisticación estructural del hormigón.

Se usó como laboratorio a escala para estudiar el comportamiento de los tabloncillos, su reacción a condiciones ambientales y punto débiles de la estructura. Juntando 5 capas de listones de madera superpuestos y unidos entre sí, rotando la dirección de cada uno según la solicitación de las cargas, se buscaba obtener el mejor comportamiento estructural mientras se apuntaba a la simplificación para prefabricación.

Este impulso se extendió por Europa. En Suiza, el ingeniero Hans-Heini Gasser y el arquitecto Otto Schärli aplicaron estos principios en 1971 al cubrir una iglesia con un paraboloide

hiperbólico de madera apoyado sobre pilares de hormigón. El proyecto demostraba cómo estas formas podían adaptarse a programas reales, combinando ligereza estructural con calidez material. Es una muestra de la depuración y aplicación de la técnica.



Figura 61. Iglesia en Suiza, cubierta PH de madera

Pese a existir algunas otras materializaciones la falta de herramientas digitales y los costes de fabricación artesanal las condenaron a permanecer reservadas, como experimentos marginales o como proyectos puntuales. La industria se orientó hacia la estandarización y la producción en serie de elementos industrializados fácilmente reproducibles y con poca sinuosidad formal, abandonando la complejidad geométrica en favor de la eficiencia productiva.

Hoy, la tecnología digital ha eliminado aquellas barreras: el diseño paramétrico permite optimizar formas, la computación avanzada simula comportamientos estructurales y la robótica fabrica y construye con precisión milimétrica.



Figura 62. Paraboloide Hiperbólico experimental de tabloncillo de madera, Stuttgart, 1963

3

SISTEMA FRACTAL: DE MAQUETA A MERCADO

La naturaleza, declarada como maestra de la eficiencia y del diseño, nos deja pistas del funcionamiento intrínseco de la materia, viva o inerte. A aquellos que asuman humilde y servilmente su posición de aprendiz respecto de este creador supremo se les garantiza lecciones del ser de las cosas, para que traten de honrarlas reinterpretándolas y representándolas a través del filtro de la consciencia humana.

Una de las propiedades intrínsecas observables de la naturaleza, en las matemáticas y en la geometría, es su cualidad fractal, esto es, la propiedad de un objeto donde un patrón propio se repite a diferentes escalas. Este concepto se basa en la autosimilitud y la complejidad irregular de las formas, aunque, con el propósito de aprender y reinterpretar las propiedades naturales, podemos aplicar dicha cualidad a la propuesta arquitectónica de una manera más simplificada.

3.1 Autopsia del Paraboloide Hiperbólico

El paraboloide hiperbólico, expresión de maestría estructural, experimenta en el ámbito digital una transformación que trasciende su condición de forma estática para convertirse en un sistema de relaciones geométricas parametrizables.

Esta evolución conceptual, facilitada por herramientas computacionales como Grasshopper -mismo programa empleado en las investigaciones pioneras de Achim Menges-, permite no solo deconstruir la geometría canónica del PH, sino reinterpretarla estableciendo un diálogo entre la herencia estructural de Félix Candela y las posibilidades ofrecidas por la fabricación digital avanzada.

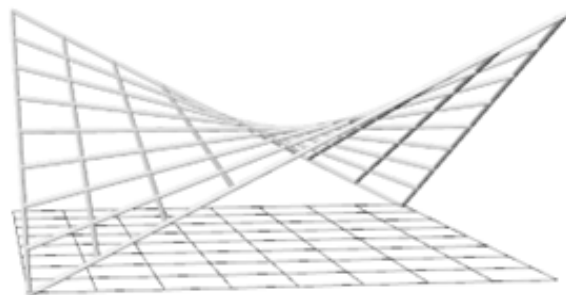


Figura 63. Imagen del autor. PH en Grasshopper

La propuesta se articula sobre una base modular con potencial fractal, concebida específicamente para su implementación en espacios públicos de interacción social. La elección de dos escalas principales -20x20 metros para la configuración principal y 10x10 metros para versiones reducidas- responde a consideraciones tanto funcionales como estructurales. La cualidad del PH de sostenerse sobre solo dos vértices opuestos se preserva, manteniendo así la preciada planta libre que caracterizó los espacios cubiertos por Candela y que resulta particularmente idónea para usos comunitarios y multifuncionales.

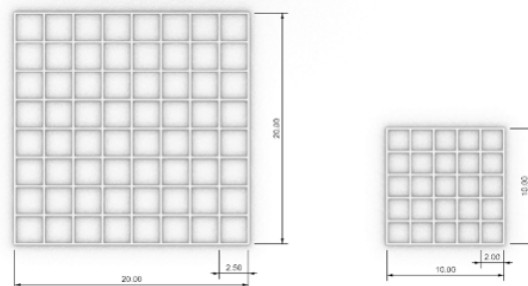


Figura 64. Imagen del autor. Reticulas PH

La retícula subyacente de 2.5m y 2m respectivamente no constituye un mero recurso formal, sino la expresión geométrica de un sistema estructural optimizado. La dimensionalidad de la retícula obedece a restricciones técnicas de fabricación y transporte profundamente analizadas.

En línea con el objetivo de hacer estas estructuras accesibles para la sociedad, se han establecido límites dimensionales basados en parámetros industriales reales: las dimensiones máximas de contenedores marítimos estándar (2.90m) y los rangos de trabajo de brazos robóticos industriales (3.5m).

El módulo base propuesto, de 2.50m, representa así la optimización de múltiples variables estructurales, logísticas y económicas, garantizando no solo la viabilidad técnica sino también la accesibilidad económica del sistema.

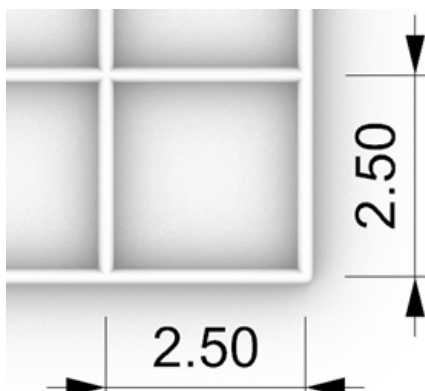


Figura 65. Imagen del autor. Dimensión modular

La naturaleza de superficie reglada del PH permite su modelación mediante algoritmos generativos que controlan paramétricamente la curvatura, orientación y densidad de la malla estructural.

Esta aproximación computacional posibilita el mapeo tridimensional preciso de cada vértice, arista y plano, la generación automática de instrucciones de fabricación CNC con tolerancias milimétricas, y el análisis de tensiones mediante elementos finitos (FEM) integrado para optimización material. El comportamiento de membrana, intrínseco a la doble curvatura del PH, emerge así como consecuencia directa de una configuración geométrica computacionalmente optimizada.

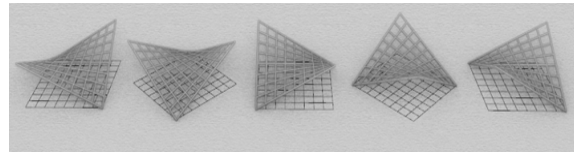


Figura 66. Imagen del autor. PH rotado

La simetría cuádruple en planta del sistema representa otra ventaja notable desde el enfoque computacional. Esta propiedad geométrica reduce la variedad de piezas únicas necesarias en un 75%, permitiendo la fabricación seriada mediante rotaciones y simetrías, eliminando esfuerzos horizontales intrínseco a su geometría, y facilitando el ensamblaje in situ mediante protocolos estandarizados y robots. La industrialización del proceso constructivo responde así como consecuencia natural de la optimización geométrica.

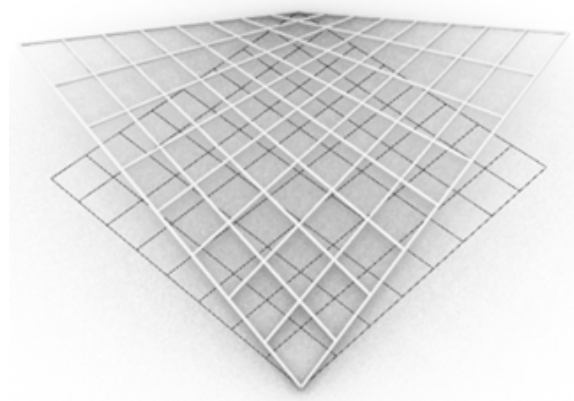


Figura 67. Imagen del autor. Vista superior PH

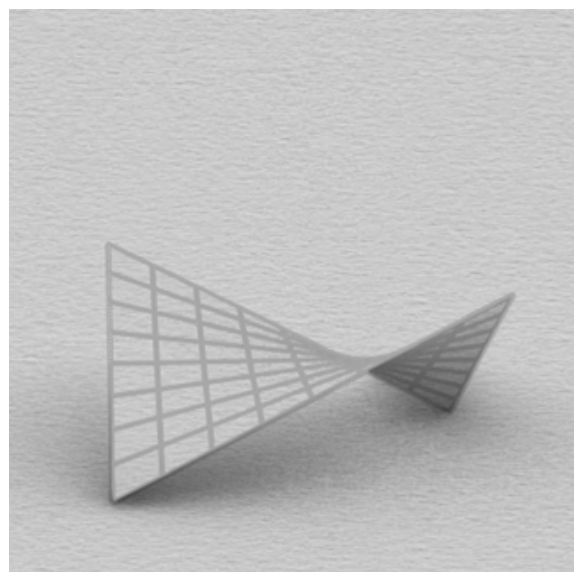


Figura 68. Imagen del autor. Vista lateral PH

El sistema propuesto escala mediante la propiedad fractal de la retícula modular, siguiendo la lógica estructural y compositiva de la Gasolinera El Rebollet de Haro Piñar, donde se solapan varios PH.

La configuración de cuatro PH interconectados genera una planta libre -considerando la propuesta de mayor dimensión- de 40x40m (1600 m²) sin apoyos intermedios, con solo cuatro puntos de apoyo localizados estratégicamente en los puntos medios de cada lado. Esta solución, computacionalmente validada mediante prototipos virtuales que implementan las mismas estrategias de fabricación digital empleadas por Menges, demuestra la viabilidad tanto estructural como manufacturera del sistema propuesto.

La adaptación computacional de la propuesta remarca varios avances que facilitan y hacen posible la reinterpretación de la forma: la parametrización total de las variables

geométricas y estructurales, la simulación en tiempo real del comportamiento de la superficie bajo cargas hipotéticas y la generación automática de documentación técnica e instrucciones de fabricación. Este enfoque establece un salto digital en la manera de diseñar estas superficies y su materialización en obra, incorporando el principio de “datos como herramienta” que caracteriza la obra de Menges.

En conclusión, esta reinterpretación digital del paraboloide hiperbólico representa una sinergia de valores, entre la herencia estructural de Candela y las tecnologías digitales actuales. Demuestra que la belleza matemática de las superficies de doble curvatura debe ser actualizada para crear sistemas constructivos eficientes, escalables y sostenibles, remarcando el potencial de la fusión Candela-Menges para la arquitectura del siglo XXI.

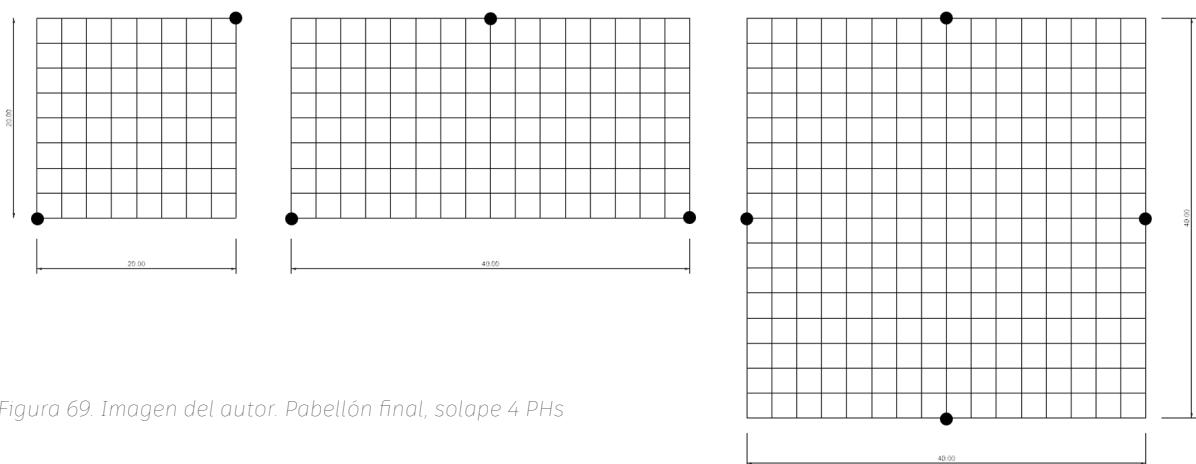


Figura 69. Imagen del autor. Pabellón final, solape 4 PHs

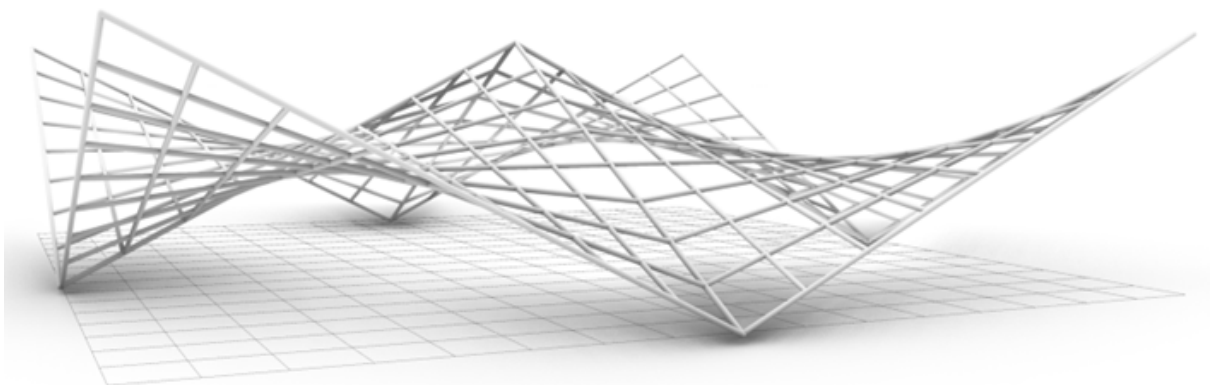


Figura 70. Imagen del autor. Pabellón final, ejes estructurales reglados de las superficies

3.2 Módulos que Cobijan

Los pabellones expuestos del equipo de Menges tienen una particularidad común: la optimización y personalización heterogénea de los módulos que los componen. Sus formas son libres, por eso requieren de cientos de módulos únicos; nuestra forma está preestablecida, e intrínsecamente optimizada, por eso podemos producir en masa.

El BUGA Wood Pavilion de 2019 cuenta con 376 piezas únicas capaces de cubrir 500 m²; nuestro pabellón, compuesto por 4 Paraboloides Hiperbólicos, espera cubrir 1600 m² con 256 piezas, de las cuales sólo 40 son únicas, el resto -gracias a las propiedades intrínsecas de la forma- se repiten y simetrizan; supone un salto inmenso para la industrialización y producción en serie de estas superficies esculturales que aguardan un rescate en nuestra generación.

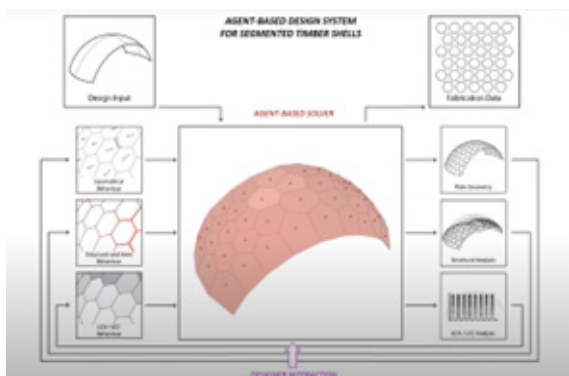


Figura 71. Retrospección computacional. Menges

La investigación realizada en el taller de Menges sobre el comportamiento de la madera establece un paradigma constructivo basado en la estratificación funcional. Sus pabellones demuestran que el rendimiento estructural no depende de la masa, sino de la optimización geométrica y material. Sus módulos han servido como fuente de estudio para el correcto entendimiento del comportamiento de la superficie resultante de los pabellones, además de permitirnos analizar su diseño, abstraerlo y reinterpretarlo para adaptarse a nuestra retícula tridimensional.

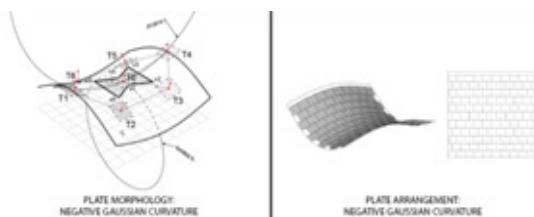


Figura 72. Interpretación computacional superficie

Se compone de tres capas principales:

- Capa superior: Lámina de cerramiento (3-5 cm) que proporciona rigidez estructural y sirve como base para la capa de impermeabilización.
- Capa intermedia: Estructura principal perimetral -dentro de cada módulo- que funciona como domo hexagonal teselado (12-15 cm). Responde a las trayectorias de cargas principales gracias al análisis computacional y los patrones geométricos variables.
- Capa inferior: Lámina delgada de madera laminada (1-3 cm) con patrones de corte parametrizados. Sirve principalmente como control estético de la cara interna visible del pabellón y como rigidizador superficial colaborante.

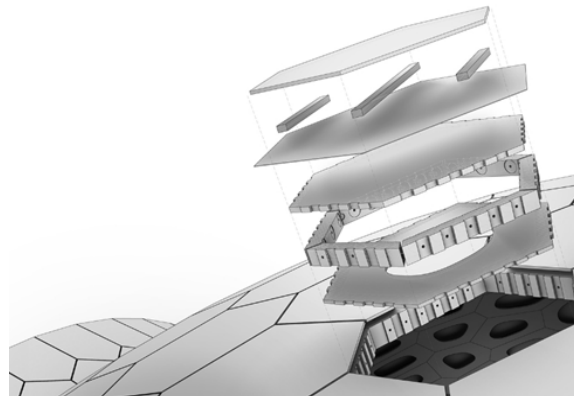


Figura 73. Detalle módulo Wood Pavilion 2019

Este sistema de triple capa remarca una eficiencia estructural excepcional: logra cubrir espacios de +500m² con espesores menores a 25 cm, demostrando que la madera laminada puede comportarse como material de extrema eficiencia cuando se diseña sobre modelos computacionales y se fabrica con las mayor es innovaciones tecnológicas.¹⁹

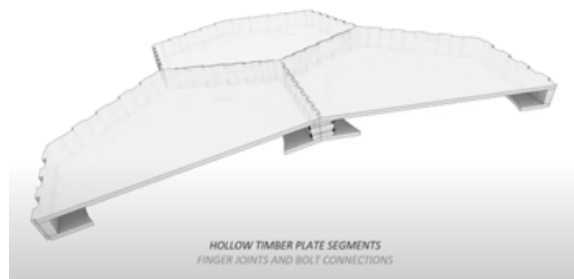


Figura 74. Diagrama módulos Wood Pavilion 2019

La adaptación de este sistema al módulo cuadrado de 2.5x2.5m del paraboloide hiperbólico implica una reformulación paramétrica que mantiene los principios de Menges pero los adapta y potencia para promover la producción seriada, simplificando el ensamblaje estandarizando las uniones de cola de milano con ángulos constantes y fomentar el transporte eficiente, permitiendo el empaquetado plano para facilitar la logística en camiones o contenedores marítimos.

El modelo 3D planteado muestra una reinterpretación formal que gracias al comportamiento de membrana del paraboloide hiperbólico garantiza el correcto funcionamiento y la cómoda adaptación a la nueva morfología; se ha optado por aumentar ligeramente los grosores para el modelo propuesto, habría que realizar simulaciones

FEM y obtener una retroalimentación computacional del comportamiento de la superficie, pero dado que esto es un trabajo académico proyectual se asume su hipotético correcto funcionamiento sustentado en la evidencia formal y proyectual, tanto de los pabellones de Menges como del comportamiento intrínseco del PH y del propio material; aplicando las bases se asume su viabilidad con sus consecuentes ajustes.

Al insertar el módulo reinterpretado en la trama conceptual del paraboloide hiperbólico obtenemos el siguiente modelo donde cada módulo adopta la curvatura necesaria, esto puede hacerse de manera mecánica, o como ya ha demostrado Menges que es viable, preprogramando el material para que adopte la forma final gracias a la humedad y orientación de las fibras.

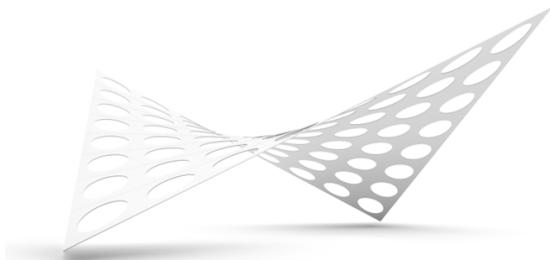


Figura 75. Imagen del autor. PH con superficie estética

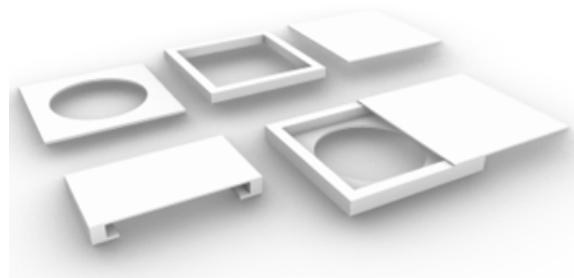


Figura 76. Imagen del autor. Modelo reinterpretación modular.

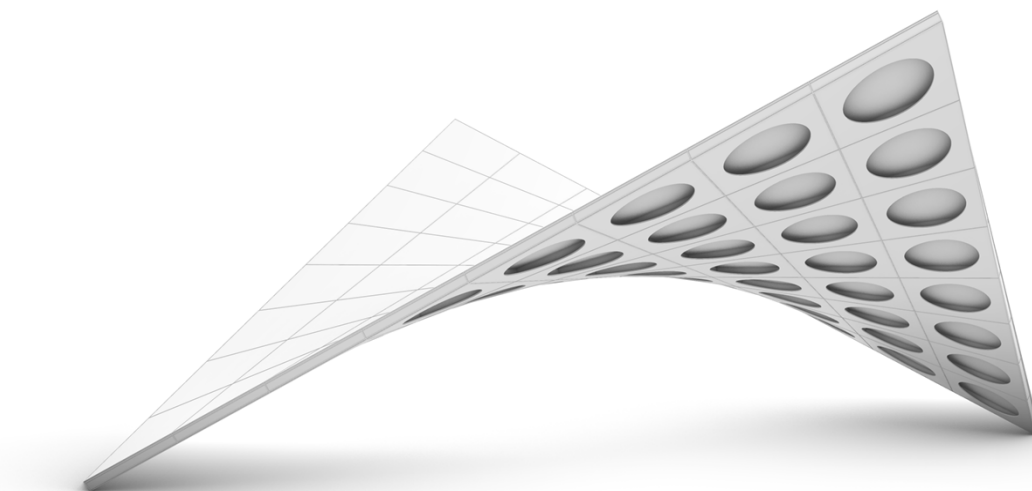


Figura 77. Imagen del autor. PH resultante, superficie compuesta por módulos reinterpretados

El Paraboloide hiperbólico compuesto por módulos de madera laminada preprogramados para adoptar su curvatura final y optimizados computacionalmente para alinear las propias fibras según la distribución de tensiones y resistir la mayor carga con la mínima sección necesaria culmina en una escultura tridimensional que sugiere una posibilidad de recuperar estas formas con los principios de Menges.

El sistema constructivo completo reduce potencialmente un 80% el peso respecto a la solución equivalente en hormigón y puede montarse en 3 o 4 semanas con equipo mínimo gracias a la prefabricación extrema y a la mano robótica colaborativa. Esta propuesta trasciende lo tecnológico para establecer

un nuevo paradigma de diseño: posibilidades geométricas con formas sinuosas, eficiencia material radical donde se aprovecha +95% con el corte CNC, y la capacidad reversible del sistema donde todos los componentes son desmontables y reutilizables.²⁰

El pabellón resultante es un sistema dinámico donde arquitectura, estructura y robótica se funden representando la materialización definitiva de la fusión Candela-Menges; compuesto por cuatro paraboloides hiperbólicos, logrando cubrir una superficie de 1600 m² de planta libre sin apoyos intermedios, se alza como una escultura ideal para espacios públicos y zonas de interacción social.

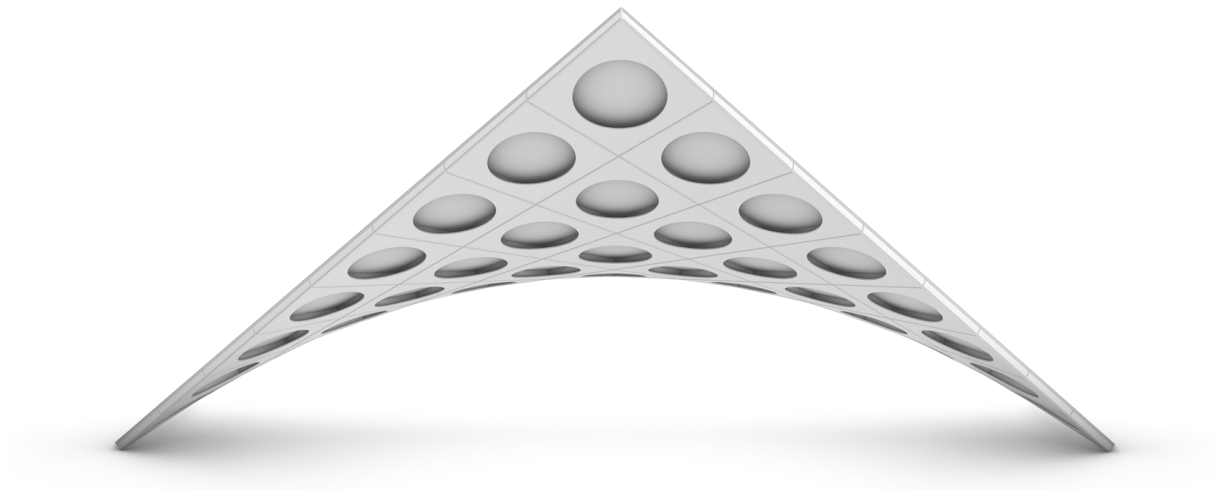


Figura 78. Imagen del autor. Vista frontal PH reinterpretado

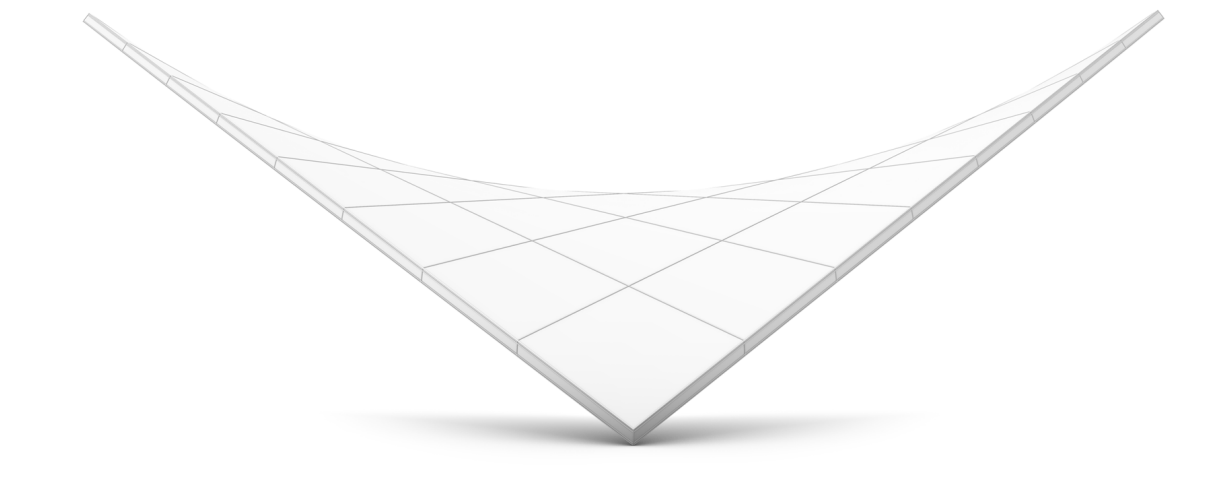


Figura 79. Imagen del autor. Vista lateral PH reinterpretado

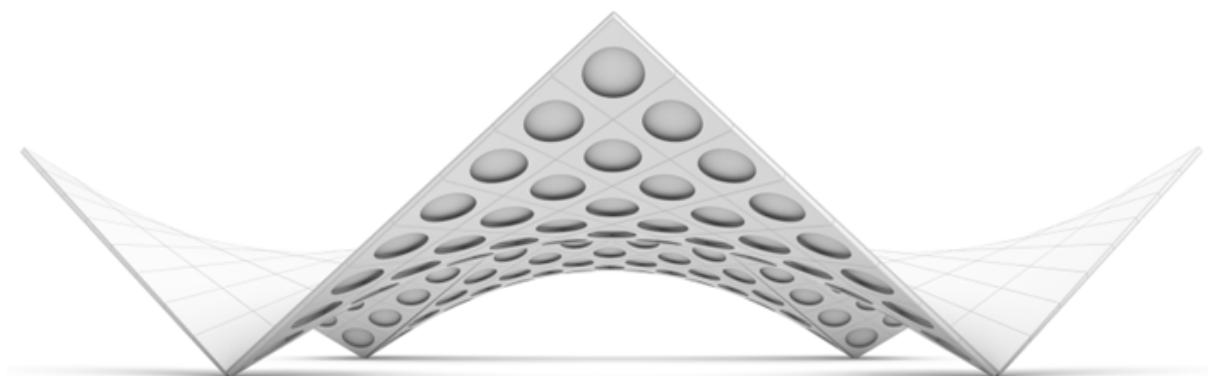


Figura 80. Imagen del autor. Vista frontal pabellón resultante, 40x40m

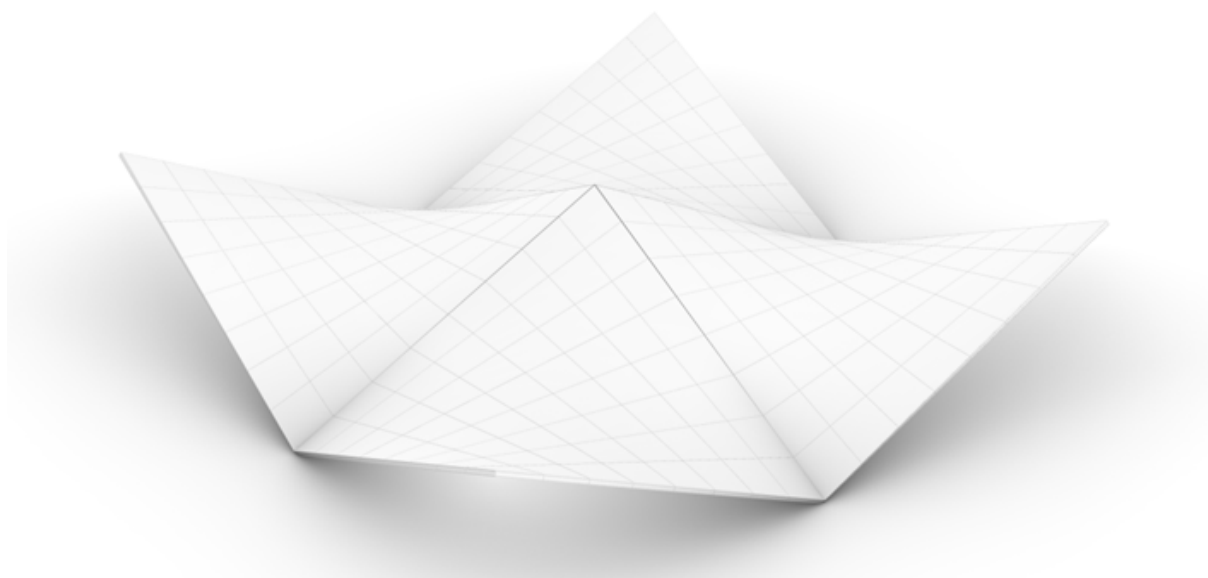


Figura 81. Imagen del autor. Vista superior pabellón resultante, 40x40m

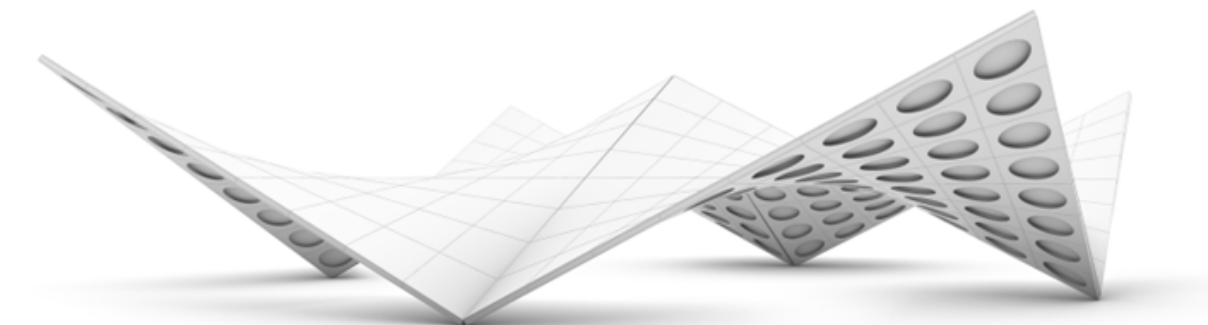


Figura 82. Imagen del autor. Vista perspectiva pabellón resultante, 40x40m

3.3 Arquitectura Semilla

A continuación, se presenta el resultado proyectual: la materialización de un sistema constructivo que reconcilia herencia estructural e innovación contemporánea.

El objetivo trasciende lo formal: se trata de demostrar que las audaces geometrías candelianas pueden producirse en serie gracias a las herramientas digitales y los principios de fabricación robótica desarrollados por Achim Menges. Esto permite recuperar para la sociedad unas formas que, durante décadas, permanecieron confinadas en la historia de la arquitectura como reliquias de museo.

La capacidad constructiva, modulable y logística del sistema ha sido verificada mediante prototipos reales. No es una utopía tecnológica, sino una arquitectura concienciada y alternativa socialmente viable.

El resultado es un pabellón de madera laminada, sostenible y multiusos, diseñado por y para la sociedad. Un espacio que responde a necesidades concretas: refugio climático en parques urbanos, espacio para exposiciones, cubierta para mercados locales, escenario para eventos y celebraciones, pabellón deportivo

ligero o incluso modelo educativo para estudiantes y maestros. Su naturaleza fractal y desmontable lo hace adaptable a cualquier superficie disponible y a las diferentes temporadas de eventos, con un rango que va desde los 10x10 metros hasta los 40x40 metros de superficie en planta, construíble en un plazo de una a tres semanas o cuatro semanas. Se propone la incorporación de dos pabellones estratégicos en la trama verde de Valencia.

La primera ubicación se sitúa en los Jardines del Real o Viveros, núcleo verde que conecta el cauce del Turia con la avenida Blasco Ibáñez. Esta explanada, adjunta al Museo de Ciencias Naturales y epicentro de la Feria del Libro, acoge un pabellón de menores dimensiones, pero igual versatilidad. Pretende servir como cubierta para los puestos de librerías locales durante la feria, como espacio de extensión cultural del museo o simplemente como refugio de sombra y estar para visitantes. Su escala más reducida (20x20 m) demuestra la adaptabilidad del sistema a diferentes contextos y necesidades, siempre desde el respeto al entorno y la funcionalidad social.



Figura 83. Imagen del autor. Vista aérea, integración pabellón propuesto de 20x20m en los Viveros de Valencia

El segundo se ubica en el antiguo cauce del Turia, icono universal de jardín urbano, concretamente en la explanada dedicada a eventos donde se instala la Feria de Valencia.

Aquí, una estructura de 40x40 metros se integra con sorprendente naturalidad en este paisaje fluvial transformado. La madera laminada dialoga con la vegetación circundante como si siempre hubiera pertenecido a este lugar, estableciendo una relación colaborativa entre lo natural y lo fabricado. El resultado es un espacio cubierto de 1600 m² de planta libre, que articula el corredor verde con una presencia a la vez monumental y ligera.

Estos pabellones representan una arquitectura que no se impone, sino que se ofrece. Su grandeza no reside en su escala o complejidad formal, sino en su capacidad para generar bienestar, encuentro y belleza.

En un mundo cada vez más urbanizado y sometido a tensiones climáticas y sociales, espacios como estos son testigos de que otra relación entre lo construido y lo natural es posible.

Art I assume to be any direction of the practical intellect to making things.

-Alan Harris

Addis, B. (2001) *Creativity and Innovation: The Structural Engineer's Contribution to Design*. Architectural Press.



Figura 84. Imagen del autor. Vista peatón, integración pabellón propuesto de 40x40m en cauce del Turia, Valencia



Figura 85. Imagen del autor. Vista aérea, integración pabellón propuesto de 40x40m en cauce del Turia, Valencia

4

HACIA UNA INDUSTRIA ETICA

4.1 Objetivos: La Arquitectura como Compromiso Ético²¹

Frente a los desafíos del siglo XXI, este proyecto trata de exponerse como modelo de arquitectura ética. No se trata solo de construir mejor, sino de redefinir cómo, para quién y por qué construimos. La propuesta funciona como un sistema que trata dos aspectos fundamentales: la sostenibilidad material y la democratización espacial.

En el ámbito de la sostenibilidad, el proyecto trabaja bajo principios de ecología circular. La madera certificada es una declaración intencional: cada metro cúbico utilizado participa absorbiendo carbono de la atmósfera, invirtiendo el modelo de la construcción convencional. El ciclo de vida completo del pabellón se diseña como un sistema cerrado donde los residuos prácticamente se eliminan: todo componente es desmontable, reutilizable o compostable.

La democratización espacial se logra mediante una estrategia tecnológica.

- La reducción en costes respecto a las estructuras tradicionales de hormigón es el resultado de un diseño conscientemente orientado a la accesibilidad común.
- La producción seriada robotizada se convierte en la herramienta que hace asequible una arquitectura de alta calidad estética y técnica.
- La logística global a través de contenedores marítimos o grandes camiones permite que los módulos relativamente planos viajen hasta lugares remotos, mientras que el sistema de autoconstrucción guiada -mediante manuales ilustrados y aplicaciones de realidad aumentada- involucra a las comunidades locales, transformándolas en parte del proceso constructivo.

El proyecto adquiere su verdadero significado en el impacto humano final: comunidades que ganan autonomía constructiva, estudiantes que aprenden bajo cubiertas sostenibles y barrios que recuperan espacios públicos de calidad.

Esta triple dimensión (autonomía comunitaria, educación ambiental y recuperación del espacio público) convierte cada intervención en un acto de cuidado colectivo. Los barrios no solo recuperan lugares físicos de calidad, sino que reconstruyen su tejido social a través de la apropiación de unos espacios que, por fin, les pertenecen y representan.



Figura 86. Diagrama UE, economía circular

4.2 Agenda 2030²²

La arquitectura, en su esencia más profunda, es una disciplina que trasciende la mera construcción de espacios: es un acto de responsabilidad social, ambiental y cultural.

En este contexto, la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible se erige como un marco ético fundamental para reorientar la práctica arquitectónica hacia la sostenibilidad total. Esta agenda, compuesta por 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), no es solo un plan de acción global, sino una invitación a repensar cómo la arquitectura puede contribuir a un futuro más justo y resiliente. El presente TFG, centrado en la reinterpretación de estructuras laminares mediante madera y tecnología digital, se alinea explícitamente con varios de estos objetivos, transformando la teoría en acción concreta.

ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura

Este objetivo promueve infraestructuras sostenibles, resilientes y de calidad, así como la innovación tecnológica accesible. El proyecto del pabellón modular de madera laminada reclama este principio al integrar fabricación digital avanzada (corte robótico, modelado paramétrico) con técnicas constructivas eficientes. Al reemplazar los tradicionales encofrados de hormigón con un sistema de componentes prefabricados y ensamblables, se reduce el desperdicio de materiales y se optimiza la logística. Además, la propuesta plantea un modelo de microindustria local, donde talleres equipados con CNC pueden producir módulos adaptados a las necesidades de cada comunidad, fomentando economías circulares y reduciendo la huella de carbono del transporte.

ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles

Las estructuras laminares de madera propuestas no solo buscan eficiencia técnica, sino también inclusividad local. El diseño modular y escalable del pabellón permite su implementación en diversos contextos urbanos y rurales, desde plazas públicas en Valencia hasta escuelas en áreas de desarrollo prioritario. Al priorizar la planta libre y la adaptabilidad, el proyecto facilita usos comunitarios múltiples (culturales, educativos, sociales), reforzando el tejido social y promoviendo el disfrute ciudadano de los espacios. Esta aproximación refleja la apuesta de la Agenda 2030 de crear entornos

accesibles, verdes y resilientes que mejoren la calidad de vida de todos, especialmente de los grupos vulnerables.

ODS 12: Producción y Consumo Responsables

La sustitución del hormigón por madera laminada certificada es un pilar central de este TFG, alineado con la meta de garantizar patrones de producción sostenibles. La madera actúa como sumidero de carbono -almacenando hasta 1 tonelada de CO₂ por m³-, mientras que su ciclo de vida cerrado (desmontaje, reutilización, compostaje) minimiza los residuos. Además, la fabricación digital permite un ajuste milimétrico de los componentes, reduciendo los desechos de corte a menos del 5% frente al 30-40% habitual en la construcción tradicional. Este enfoque no solo responde a criterios ecológicos, sino también económicos, al abaratar costes a largo plazo y generar valor a partir de recursos renovables.

ODS 13: Acción por el Clima

La construcción es responsable del 38% de las emisiones globales de CO₂. Frente a esto, el pabellón propuesto se concibe como una respuesta climática consciente: su balance de carbono negativo -logrado mediante el uso de madera y la eficiencia energética en su ciclo de vida- contribuye a la mitigación del calentamiento global. Además, su diseño pasivo (ventilación natural, control solar mediante geometrías de doble curvatura) reduce la dependencia de sistemas de climatización artificial, alineándose con las metas de adaptación y resiliencia climática.

ODS 17: Alianzas para Lograr los Objetivos

La viabilidad de este proyecto depende de varias colaboraciones: universidades (investigación en materiales y técnicas), industrias locales (fabricación), administraciones públicas (implementación en políticas urbanas) y comunidades (gestión y mantenimiento). Esta visión comunitaria refleja el espíritu de la Agenda 2030, que enfatiza la necesidad de alianzas inclusivas para alcanzar transformaciones relevantes y duraderas. El TFG, lejos de ser un modelo puramente edificatorio, se plantea como un prototipo abierto y replicable, cuyos datos y algoritmos podrían compartirse globalmente bajo licencias, facilitando su adaptación en diversos contextos.

Conclusión: Ética como Cimiento

La arquitectura no puede ignorar su papel en la configuración del mundo que habitamos. Este TFG, al entrelazar los ODS con la reinterpretación de los hitos escultóricos del sXX, propone un camino hacia una práctica arquitectónica ética y poética, donde la belleza estructural no sea un lujo, sino un derecho accesible.

Como señalaba la Agenda 2030, se trata de no dejar a nadie atrás, y eso incluye diseñar espacios que dignifiquen, protejan e inspiren.

En última instancia, cada curva del paraboloide hiperbólico y cada lámina de madera ensamblada es un testimonio material de que otro futuro es posible: uno donde la arquitectura sirva a la vida en todas sus formas.



Figura 87. Logos Objetivos de Desarrollo Sostenible

5

CONCLUSION: LO SUBLIME COMO DERECHO SOCIAL

La arquitectura actual se caracteriza por un exceso de técnica no asimilada artísticamente. Culpar de esto a la técnica sería tan erróneo como el intento de negar su importancia y su influencia en el diseño o, lo que es peor, hacerla "más humana" mediante la decoración. Todos estos caminos no nos conducen a ningún resultado.

Constantemente se intenta interpretar el fenómeno técnico de nuestra época. Para esto se abusa ampliamente de la filosofía, la religión, el arte y las ciencias; sin embargo, falta el intento de analizar el núcleo de las ideas de proyecto, sin recurrir a reflexiones en planos muy elevados.

La comprensión de las formas técnicas presupone conocimientos, porque con la simple intuición no podrán comprenderse las formas técnicas. También las formas de la arquitectura, cuando están bajo la influencia de la técnica, no pueden apreciarse en todo su contenido sin conocimientos. El conocimiento, como premisa para la comprensión de las formas arquitectónicas, señala la incursión de la razón en el campo de la estética. Debe comprenderse claramente este hecho si se quieren analizar los problemas de la forma en el ámbito de la arquitectura actual orientada en la técnica.

Al incluir las leyes técnicas en las escalas de valor estético, el razonamiento económico adquiere mayor importancia, no teniendo nada que ver con barato en el sentido de economía. Aquí la economía será un principio intelectual, una especie de ley moral para el diseño, que trata de alcanzar la mayor eficiencia con el menor esfuerzo, incluyendo los valores intelectuales y espirituales.

Figura 88. Siegel, C., (1966). Formas estructurales en la arquitectura moderna. Continental, S. A.

En el corazón de toda sociedad avanzada late una premisa esencial: la calidad de sus espacios públicos determina la altura moral de su civilización. Grecia y Roma nos legaron una idea imperecedera que hemos olvidado en nuestro camino hacia la "modernidad": que la grandeza de una comunidad no se mide por la opulencia de sus residencias privadas, sino por la excelencia de sus ágoras, termas y foros. Hoy, frente al declive de lo colectivo, creo urgente que recuperemos esta filosofía donde el bien común prevalece sobre el interés particular.

Los griegos entendieron que la polis era mucho más que un conjunto de viviendas: era el escenario donde se desarrollaba el drama humano en su máxima expresión. El ágora no era un simple espacio abierto, sino el corazón de la democracia, donde ciudadanos iguales debatían los destinos de la comunidad bajo la luz de un único sol común. La proporción áurea de sus templos no respondía a un capricho estético, sino a la convicción profunda de que la belleza era un derecho ciudadano, no un privilegio de clase.

Roma llevó este concepto a su expresión más monumental y funcional. Sus acueductos no seguían el camino más corto, sino el que llevaba agua limpia a toda la población. Las termas no eran lujos, sino espacios donde todos los habitantes compartían la misma agua y los mismos debates. Esta civilización entendió que un ciudadano que se siente parte de algo más grande que sí mismo es capaz de logros imposibles para el individuo aislado.

Hoy vivimos las consecuencias de haber olvidado estas lecciones. Nuestras plazas se han convertido en aparcamientos, nuestros centros cívicos en centros comerciales, y nuestras avenidas en meros corredores de tránsito. Hemos privilegiado el jardín privado sobre el parque público, la urbanización cerrada sobre el barrio abierto o el coche individual sobre el transporte colectivo.

Esta filosofía no supone negar lo individual, sino elevarlo a través de lo colectivo. Porque el ser humano no alcanza su plenitud en el aislamiento de su casa, sino en el encuentro

con sus semejantes en espacios dignos y hermosos. Un parque bien diseñado no es un lujo, es la afirmación de que todos merecemos un jardín de calidad. Una biblioteca pública no es un gasto, es la declaración de que el conocimiento debe estar al alcance de todos.

Recuperar esta visión es hoy más urgente que nunca. Frente a la fragmentación social, el espacio público de calidad se convierte en el patio común donde relacionares y convivir en armonía. Frente a la crisis ambiental, nos ofrece alternativas de movilidad y consumo más sostenibles. Frente al individualismo, nos recuerda que somos, ante todo, seres sociales. Al final de este recorrido, una verdad se hace evidente: la belleza en la arquitectura no debe ser un lujo, sino un derecho común. Ya no basta con construir; ahora debemos edificar con sentido y, sobre todo, con alma. La elegancia de las formas, la honestidad de los materiales y la inteligencia de los espacios no son adornos, sino esencias de un habitar y una moral digna.

Es desde esta convicción que emergen los tres pilares que sostienen esta investigación: el legado de Candela, la madera como revolución material y la tecnología como puente hacia lo colectivo. Juntos, sientan un manifiesto donde la arquitectura deja de ser refugio de unos pocos para convertirse en cobijo de todos.

Candela en el siglo XXI

representa mucho más que la perpetuación de un legado formal; encarna la transformación de la osadía estructural con concienciación ética. El genio del maestro español no reside únicamente en su dominio técnico del hormigón, sino en su comprensión profunda de que la estructura debe conformar el espacio habitable.

Hoy rescatamos su espíritu innovador para responder a los desafíos de nuestro tiempo: donde él veía la necesidad de cubrir grandes luces con elegancia, nosotros vemos la oportunidad de hacerlo con materiales sostenibles; donde él desafiaba la gravedad con audacia formal, nosotros añadimos la necesidad de la justicia social. Estepilar nos habla de continuidad responsable, de honrar el pasado reinventándolo para que sirva al presente. Candela nos recuerda que la verdadera excelencia técnica siempre ha tenido un propósito humano:

crear espacios que elevan el espíritu y dignifican la vida colectiva.

En una sociedad que continuamente privilegia lo inmediato sobre lo duradero, su legado nos insta a recuperar la ambición por lo bien hecho, por lo bello necesario, por lo técnicamente impecable y socialmente generoso.

Del encofrado que se tira a la estructura que perdura

simboliza una de las transformaciones culturales más profundas que debemos abordar. Durante décadas, normalizamos la paradoja de usar madera -material noble y duradero- como elemento desechable.

Los encofrados desechables representaban una mentalidad asumida que hoy resulta insostenible ética y ecológicamente. Este segundo pilar propone una revolución material consciente: la madera ya no es el medio para un fin, sino el fin en sí mismo. Cada lámina curvada de madera cuenta una historia de bosques gestionados con cuidado, de carbono capturado en vez de emitido y de ciclos que se cierran con los ritmos naturales de la vida.

Esta transformación trasciende lo técnico para convertirse en una declaración filosófica sobre nuestra relación con el mundo: construimos con la naturaleza, no contra ella. La veta de la madera se convierte en testigo de origen y destino, de materiales que regresan a la tierra sin hacer daño.

En una cultura del descarte, este pilar nos enseña el valor de la permanencia, el respeto por los materiales y la responsabilidad intergeneracional.

La innovación dirige la orquesta

La innovación dirige la orquesta tecnológica, pero la partitura la escriben los valores humanos.

Los avances de Menges y otros pioneros en fabricación digital, diseño computacional y robótica nos equipan con herramientas que parecían imposibles apenas una década atrás. Podemos cortar la madera con precisión milimétrica, optimizar su orientación fibrilar para maximizar resistencia, y preensamblar componentes complejos que encajan perfectamente in situ con robots.

Pero la tecnología verdadera no reside en las máquinas, sino en la sabiduría con que las empleamos. Este tercer pilar nos habla de tecnoética aplicada: usar el poder de la innovación para democratizar el acceso a la belleza estructural. La fabricación digital no es un fin en sí misma, sino el puente que permite llevar la excelencia arquitectónica de los maestros de antaño a comunidades históricamente excluidas de ella. Donde antes la complejidad formal era sinónimo de coste prohibitivo, hoy puede ser resultado de eficiencia computacional.

Este pilar proone pensar en la tecnología no como espectáculo, sino como servicio; no como demostración de alarde técnico, sino como instrumento de equidad espacial.

Juntos, estos tres pilares plantean una visión coherente y potente para la arquitectura del siglo XXI: una disciplina que honra su legado reinventándolo, que transforma su relación con los materiales, y que emplea la innovación tecnológica para buscar el bien común.

Hablan de respeto por la historia, por la materia y por las personas; de coraje para cambiar lo que debe ser cambiado; y de generosidad para poner el conocimiento al servicio de todos.

En última instancia, estos pilares trascienden lo arquitectónico para convertirse en metáforas de los valores que nuestra sociedad necesita cultivar: la audacia para imaginar futuros mejores, el respeto por el planeta, y la sabiduría para emplear la tecnología con un propósito mayor. Nos recuerdan que el progreso no consiste en hacer lo nuevo porque es nuevo, sino en hacer lo correcto con los medios que tenemos a disposición.

Que este trabajo sirva como invitación a construir un mundo donde la belleza no sea privilegio de unos pocos, sino derecho de todos. Donde los espacios que habitamos nos hablen no solo de nuestras capacidades técnicas, sino de nuestros valores más elevados como sociedad. Donde la arquitectura, en definitiva, cumpla su vocación más noble: ser el espacio donde la vida se desarrolla con plenitud y dignidad para todos.

6

BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS

Bibliografía

Addis, B. (2001) Creativity and Innovation: The Structural Engineer's Contribution to Design. Architectural Press.

Allen, E. y Zalewski, W., (2009). Form and Forces: Designing Efficient, Expressive structures. John Wiley and Sons.

Araujo, R. (2007). Arquitectura como técnica (1). Superficies. A.T.C. Ediciones, S.L.

ArchDaily. ICD/ITKE Research Pavilion 2015-2016 / ICD/ITKE University of Stuttgart. <https://www.archdaily.com/786874/icd-itke-research-pavilion-2015-16-icd-itke-university-of-stuttgart>

Arnold, M., Dietsch, P. y Winter, S. (2023). Hyperbolic paraboloid made of diagonal laminated timber element. World Conference of Timber Engineering Oslo.

Asdrubali, F., Ferracuti, B., Lombardi, L., Guattari, C., & Evangelisti, L. (2017). A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. Building and Environment, 114, 307-332. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.023>

Blanco García, F. L. D. (2016). La arquitectura no construida de Félix Candela: evolución de la arquitectura de Félix Candela a partir de sus proyectos no construidos, 1939-1997 (Doctoral dissertation, Arquitectura).

Block, P. [Ensa de Paris-Est]. (2018). Conference Prof. Dr. Philippe Block, architect and engineer | Ensa Paris-Est. https://www.youtube.com/watch?v=PPqKmILmz_o&list=PLBpTgOuUn-0C_0VRhJD0BM4ATSG6vqSWJT&index=5

Bundesgartenschau Heilbronn 2019 GmbH. (2020). Wood Pavilion: BUGA 2019 Final Report. <https://www.buga2019.de/en/wood-pavilion>

Engel, H., (2001). Sistemas de estructuras. Sistemas estructurais. Gustavo Gili.

European Commission. (2021). New European Bauhaus: Sustainable Construction with Wood. https://europa.eu/new-european-bauhaus/index_en

Fernández, M. P. V., & Checa, Z. J. P. (2014). Arquitecturas efímeras con herramientas paramétricas. EGA Expresión Gráfica Arquitectónica, (23), 114-125.

García, R. G. (2015, October). Paraboloides hiperbólicos en España. Las aplicaciones industriales. IX Congreso Nacional y I Internacional Hispanoamericano de Historia de la Construcción, Madrid.

Grande García, S. (2013). Análisis geométrico, estructural y constructivo de la estación de servicio "El Rebollet".

Green, M. C., & Karsh, J. E. (2012). The Case for Tall Wood Buildings. Canadian Wood Council. <https://www.mg-architecture.ca/tall-wood>

Huellas de Arquitectura (2017). Así se construyó... La estación de servicio El Rebollet. <https://huellasdearquitectura.com/2017/07/31/asi-se-construyo-la-estacion-de-servicio-el-rebollet/>

Huellas de Arquitectura (2017). 1962 - La estación de servicio El Rebollet. <https://huellasdearquitectura.com/2017/07/17/1962-%C2%B7-la-estacion-de-servicio-el-rebollet/>

ICD/ITKE University of Stuttgart. Prof. Achim Menges. <https://www.uni-stuttgart.de/en/press/experts/Prof.-Achim-Menges/>

ICD/ITKE University of Stuttgart. Prototypes Baden-Württemberg Competence Network Biomimetics. ICD/ITKE Research Pavilion 2011. <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/icditke-research-pavilion-2011/>

ICD/ITKE University of Stuttgart (2014) Landesgartenschau Exhibition Hall 2014. Robotically Fabricated Lightweight Timber Shell, Schwäbisch Gmünd. <https://www.itke.uni-stuttgart.de/research/built-projects/landesgartenschau-exhibition-hall-2014/>

ICD/ITKE University of Stuttgart (2019). ICD Research Buildings / Prototypes Bundesgartenschau Heilbronn, Germany. BUGA Wood Pavilion 2019. <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/buga-wood-pavilion-2019/>

ICD/ITKE University of Stuttgart (2023). ICD Research Buildings / Prototypes Freiburg, Germany. LivMatS Biomimetic Shell. <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/livmats-biomimetic-shell/>

Ingold, L. (2024). Cáscaras de madera: hacer mucho con poco. Espazium.

International Energy Agency. (2019). Material efficiency in clean energy transitions. IEA Publications. <https://www.iea.org/reports/material-efficiency-in-clean-energy-transitions>

Jiménez, A. F. (2020). La catenaria y su influencia en la arquitectura de Gaudí. La Gaceta de la RSME, 23(2), 303-323.

Menges, A. [Vinzenz Harrer GmbH]. (2022). Webinar Aufzeichnung "Zukunft Holzbau" [Video]. https://www.youtube.com/watch?v=n-2z0xk9iZgk&list=PLBpTgOuUn0C_0VRhJD0B-M4ATSG6vqSWJT

Menges, A. [fib International Federation Structural Concrete]. (2019). fib Symp. on Conceptual Design of Structures 2019 Materialization Achim Menges-Stuttgart University. [Video]. https://www.youtube.com/watch?v=o3mP-mUnSR2c&list=PLBpTgOuUn0C_0VRhJD0B-M4ATSG6vqSWJT&index=3

Menges, A. [Stockholms Arkitektförening / The Stockholm Association of Architects] (2014). Achim Menges: Rethinking Materiality Through Computation in Architecture. [Video]. https://www.youtube.com/watch?v=PbgA-rau_4vI&list=PLBpTgOuUn0C_0VRhJD0B-M4ATSG6vqSWJT&index=4

Moore, F., (2000). Comprensión de las estructuras en arquitectura. McGraw-Hill

Naciones Unidas. (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>

Parme, A. L. (1961). Cálculo elemental de láminas en paraboloide hiperbólico. Informes de la Construcción Vol. 13, n° 130.

Peiró Bañuls, S. (2020). Análisis geométrico y constructivo de la gasolinera "El Rebollet" de Oliva en su contexto histórico (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).

Siegel, C., (1966). Formas estructurales en la arquitectura moderna. Continental, S. A.

Torroja, E., (1960). Razón y Ser de los Tipos Estructurales. Instituto técnico de la construcción y del cemento.

Referencias

1. Siegel, C., (1966). Formas estructurales en la arquitectura moderna. Continental, S. A.
2. Jiménez, A. F. (2020). La catenaria y su influencia en la arquitectura de Gaudí. La Gaceta de la RSME, 23(2), 303-323.
3. Engel, H., (2001). Sistemas de estructuras. Sistemas estruturais. Gustavo Gili.
4. Moore, F., (2000). Comprensión de las estructuras en arquitectura. McGraw-Hill
5. Moore, F., (2000). Comprensión de las estructuras en arquitectura. McGraw-Hill
6. Peiró Bañuls, S. (2020). Análisis geométrico y constructivo de la gasolinera "El Rebollet" de Oliva en su contexto histórico (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
7. [Peiró Bañuls, S. (2020). Análisis geométrico y constructivo de la gasolinera "El Rebollet" de Oliva en su contexto histórico (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València)] y [Grande García, S. (2013). Análisis geométrico, estructural y constructivo de la estación de servicio "El Rebollet"]
8. Blanco García, F.L.D. (2016). La arquitectura no construida de Félix Candela: evolución de la arquitectura de Félix Candela a partir de sus proyectos no construidos, 1939-1997 (Doctoral dissertation, Arquitectura).
9. [Parme, A. L. (1961). Cálculo elemental de láminas en paraboloide hiperbólico. Informes de la Construcción Vol. 13, n° 130] y [Allen, E. y Zalewski, W., (2009). Form and Forces: Designing Efficient, Expressive structures. John Wiley and Sons]
10. ICD/ITKE University of Stuttgart. Prof. Achim Menges. <https://www.uni-stuttgart.de/en/press/experts/Prof.-Achim-Menges/>
11. ICD/ITKE University of Stuttgart. Prototypes Baden-Württemberg Competence Network Biomimetics. ICD/ITKE Research Pavilion 2011. <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/icditke-research-pavilion-2011/>
12. ICD/ITKE University of Stuttgart (2014) Landesgartenschau Exhibition Hall 2014. Robotically Fabricated Lightweight Timber Shell, Schwäbisch Gmünd. <https://www.itke.uni-stuttgart.de/research/built-projects/landesgartenschau-exhibition-hall-2014/>
13. ArchDaily. ICD/ITKE Research Pavilion 2015-2016 / ICD/ITKE University of Stuttgart. <https://www.archdaily.com/786874/icd-itke-research-pavilion-2015-16-icd-itke-university-of-stuttgart>
14. ICD/ITKE University of Stuttgart (2019). ICD Research Buildings / Prototypes Bundesgartenschau Heilbronn, Germany. BUGA Wood Pavilion 2019. <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/buga-wood-pavilion-2019/>
15. ICD/ITKE University of Stuttgart (2023). ICD Research Buildings / Prototypes Freiburg, Germany. LivMatS Biomimetic Shell. <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/livmats-biomimetic-shell/>
16. [Menges, A. [Vinzenz Harrer GmbH]. (2022). Webinar Aufzeichnung "Zukunft Holzbau" [Video]. https://www.youtube.com/watch?v=n2z0xk9iZgk&list=PLBpTgOuUn0C_0VRhJD0BM4ATSG6vqSWJT] y [Menges, A. [Stockholms Arkitektförning / The Stockholm Association of Architects] (2014). Achim Menges: Rethinking Materiality Through Computation in Architecture. [Video]. https://www.youtube.com/watch?v=PbgArau_4vI&list=PLBpTgOuUn0C_0VRhJD0BM4ATSG6vqSWJT&index=4]
17. [Asdrubali, F., Ferracuti, B., Lombardi, L., Guattari, C., & Evangelisti, L. (2017). A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. Building and Environment, 114, 307-332. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.023>] ; [European Commission. (2021). New European Bauhaus: Sustainable Construction with Wood. https://europa.eu/new-european-bauhaus/index_en] y [Green, M. C., & Karsh, J. E. (2012). The Case for Tall Wood Buildings. Canadian Wood Council. <https://www.mg-architecture.ca/tall-wood>]

18. [Ingold, L. (2024). Cáscaras de madera: hacer mucho con poco. Espazium.] y [Arnold, M., Dietsch, P. y Winter, S. (2023). Hyperbolic paraboloid made of diagonal laminated timber element. World Conference of Timber Engineering Oslo.]

19. [Bundesgartenschau Heilbronn 2019 GmbH. (2020). Wood Pavilion: BUGA 2019 Final Report. <https://www.buga2019.de/en/wood-pavilion>]; [Menges, A. [Stockholms Arkitektförning / The Stockholm Association of Architects] (2014). Achim Menges: Rethinking Materiality Through Computation in Architecture. [Video]. https://www.youtube.com/watch?v=PbgA-rau_4vI&list=PLBpTgOuUn0C_0VRhJD0BM4ATSG6vqSWJT&index=4] y [Menges, A. [fib International Federation Structural Concrete]. (2019). fib Symp. on Conceptual Design of Structures 2019 Materialization Achim Menges-Stuttgart University. [Video]. https://www.youtube.com/watch?v=o3mPmUnSR2c&list=PLBpTgOuUn0C_0VRhJD0BM4ATSG6vqSWJT&index=3]

20. [Menges, A. [Vinzenz Harrer GmbH]. (2022). Webinar Aufzeichnung “Zukunft Holzbau” [Video]. https://www.youtube.com/watch?v=n2z0xk9iZgk&list=PLBpTgOuUn0C_0VRhJD0BM4ATSG6vqSWJT] y [Menges, A. [fib International Federation Structural Concrete]. (2019). fib Symp. on Conceptual Design of Structures 2019 Materialization Achim Menges-Stuttgart University. [Video]. https://www.youtube.com/watch?v=o3mPmUnSR2c&list=PLBpTgOuUn0C_0VRhJD0BM4ATSG6vqSWJT&index=3]

21. Naciones Unidas. (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/> ; [International Energy Agency. (2019). Material efficiency in clean energy transitions. IEA Publications. <https://www.iea.org/reports/material-efficiency-in-clean-energy-transitions>] y [European Commission. (2021). New European Bauhaus: Sustainable Construction with Wood. https://europa.eu/new-european-bauhaus/index_en]

Figuras

Figura 1. Imagen del autor. Distribución esfuerzos en arcos

Figura 2. Sección Sainte Chapelle, Francia. <https://x.com/sergiosrojo/status/128969228739244033>

Figura 3. Imagen del autor. Catenarias e inversión

Figura 4. Dualidad esfuerzos en una superficie. https://x.com/Estructuras_IEE/status/1444908883378573314

Figura 5. Esquema funicular formas sinclásticas. Engel, H., (2001). *Sistemas de estructuras. Sistemas estructurais*. Gustavo Gili.

Figura 6. Paraboloide Hiperbólico anticlástico. <https://fundaayc.com/tag/paraboloide/>

Figura 7. Dualidad superficies doble curvatura. Moore, F., (2000). *Comprensión de las estructuras en arquitectura*. McGraw-Hill

Figura 8. Maqueta Club de Táchira, 1956. Eduardo Torroja. <https://www.facebook.com/veredesArquitecturayDivulgacion/photos/mi%C3%A9rcles-club-de-t%C3%A1chira-caracas-venezuela-1956-eduardo-torroja-miret-jose-fruc/10154714820789926/>

Figura 9. Maqueta cubierta Hipódromo de la Zarzuela. Allen, E. y Zalewski, W., (2009). *Form and Forces: Designing Efficient, Expressive structures*. John Wiley and Sons.

Figura 10. Diagrama restaurante Los Manantiales. Allen, E. y Zalewski, W., (2009). *Form and Forces: Designing Efficient, Expressive structures*. John Wiley and Sons.

Figura 11. Gasolinera El Rebollet. Huellas de Arquitectura (2017). 1962 – La estación de servicio El Rebollet. <https://huellasdearquitectura.com/2017/07/17/1962-%C2%B7-la-estacion-de-servicio-el-rebollet/>

Figura 12. Edificio de la Bauhaus en Dessau. https://www.urbipedia.org/hoja/Edificio_para_la_Bauhaus

Figura 13. Capilla abierta de Cuernavaca, Palmira, México. Félix Candela. https://www.urbipedia.org/hoja/F%C3%A9lix_Candela#/media/Archivo:FelixCandela.CapillaPalmira.jpg

Figura 14. Vista peatón gasolinera El Rebollet. Huellas de Arquitectura (2017). 1962 – La estación de servicio El Rebollet. <https://huellasdearquitectura.com/2017/07/17/1962-%C2%B7-la-estacion-de-servicio-el-rebollet/>

Figura 15. Planta comercio y repostaje, El Rebollet. Grande García, S. (2013). *Análisis geométrico, estructural y constructivo de la estación de servicio "El Rebollet"*.

Figura 16. Alzados, El Rebollet. Grande García, S. (2013). *Análisis geométrico, estructural y constructivo de la estación de servicio "El Rebollet"*.

Figura 17. Decadencia del restaurante El Rebollet. Huellas de Arquitectura (2017). 1962 – La estación de servicio El Rebollet. <https://huellasdearquitectura.com/2017/07/17/1962-%C2%B7-la-estacion-de-servicio-el-rebollet/>

Figura 18. Cubierta paraboloides hiperbólicos El Rebollet. Huellas de Arquitectura (2017). 1962 – La estación de servicio El Rebollet. <https://huellasdearquitectura.com/2017/07/17/1962-%C2%B7-la-estacion-de-servicio-el-rebollet/>

Figura 19. . Cabaret La Jacaranda, Acapulco, México. Félix Candela. https://www.urbipedia.org/hoja/F%C3%A9lix_Candela#/media/Archivo:FelixCandela.CabaretJacaranda.jpg

Figura 20. Retrato Félix Candela. <https://metascopios.wordpress.com/2014/05/08/la-geometria-en-los-tiempos-del-prisma/>

Figura 21. Restaurante Los Manantiales. <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/restaurante-los-manantiales/#los-manantiales-28229>

Figura 22. Estación metro San Lázaro. <https://intranet.pogmacva.com/fr/obras/62454>

Figura 23. Oceanográfico de València. <https://www.flickr.com/photos/mirkl/37949851431>

Figura 24. Diferentes representaciones PH. <https://es.scribd.com/document/466295881/PARABOLOIDE-HIPERBOLICO-SGV-A>

Figura 25. . Esfuerzos resultantes. Siegel, C., (1966). *Formas estructurales en la arquitectura moderna*. Continental, S. A.

Figura 26. Superficie reticular. Siegel, C., (1966). *Formas estructurales en la arquitectura moderna*. Continental, S. A.

Figura 27. Variaciones formales. Allen, E. y Zalewski, W., (2009). *Form and Forces: Designing Efficient, Expressive structures*. John Wiley and Sons.

Figura 28. Encofrado superficie reglada. Araujo, R. (2007). *Arquitectura como técnica (1). Superficies*. A.T.C. Ediciones, S.L.

Figura 29. Imagen del autor. Tabla 1. Características PH

Figura 30. Retrato Achim Menges. <https://www.oskarvonmillerforum.de/en/event/rethinking-architecture/>

Figura 31, 32, 33, 34. Research Pavilion 2011. ICD/ITKE University of Stuttgart. Prototypes Baden-Württemberg Competence Network Biomimetics. ICD/ITKE Research Pavilion 2011. <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/icditke-research-pavilion-2011/>

Figura 35, 36, 37. Landesgartenschau Exhibition Hall, 2014. ICD/ITKE University of Stuttgart (2014) Landesgartenschau Exhibition Hall 2014. Robotically Fabricated Lightweight Timber Shell, Schwabisch Gmund. <https://www.itke.uni-stuttgart.de/research/built-projects/landesgartenschau-exhibition-hall-2014/>

Figura 38, 39. ICD/ITKE Research Pavilion 2016. ArchDaily. ICD/ITKE Research Pavilion 2015-2016 / ICD/ITKE University of Stuttgart. <https://www.archdaily.com/786874/icd-itke-research-pavilion-2015-16-icd-itke-university-of-stuttgart>

Figura 40, 41, 42, 43. BUGA Wood Pavilion 2019. ICD/ITKE University of Stuttgart (2019). ICD Research Buildings / Prototypes Bundesgartenschau Heilbronn, Germany. BUGA Wood Pavilion 2019. <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/buga-wood-pavilion-2019/>

Figura 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53. LivMats Biomimetic Shell 2023. ICD/ITKE University of Stuttgart (2023). ICD Research Buildings / Prototypes Freiburg, Germany. LivMatS Biomimetic Shell. <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/livmats-biomimetic-shell/>

Figura 54, 55. BUGA Wood Pavilion 2019. ICD/ITKE University of Stuttgart (2019). ICD Research Buildings / Prototypes Bundesgartenschau Heilbronn, Germany. BUGA Wood Pavilion 2019. <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/buga-wood-pavilion-2019/>

Figura 56. LivMats Biomimetic Shell 2023. ICD/ITKE University of Stuttgart (2023). ICD Research Buildings / Prototypes Freiburg, Germany. LivMatS Biomimetic Shell. <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/livmats-biomimetic-shell/>

Figura 57. Imagen del autor. PH en Grasshopper

Figura 58. BUGA Wood Pavilion 2019. ICD/ITKE University of Stuttgart (2019). ICD Research Buildings / Prototypes Bundesgartenschau Heilbronn, Germany. BUGA Wood Pavilion 2019. <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/buga-wood-pavilion-2019/>

Figura 59. Imagen chimeneas industriales. <https://www.istockphoto.com/es/foto/chimeneas-industriales-con-gruesas-nubes-de-humo-sobre-cielo-azul-calentamiento-gm1193931636-339785501>

Figura 60. Imagen del autor. Tabla2. Comparativa Hormigón vs. Madera.

Figura 61. Iglesia en Suiza, cubierta PH de madera. Ingold, L. (2024). Cáscaras de madera: hacer mucho con poco. Espazium.

Figura 62. Paraboloide Hiperbólico experimental de tabloncillos de madera, Stuttgart, 1963. Arnold, M., Dietsch, P. y Winter, S. (2023). Hyperbolic paraboloid made of diagonal laminated timber element. World Conference of Timber Engineering Oslo.

Figura 63. Imagen del autor. PH en Grasshopper

Figura 64. Imagen del autor. Retículas PH

Figura 65. Imagen del autor. Dimensión modular

Figura 66. Imagen del autor. PH rotado

Figura 67. Imagen del autor. Vista superior PH

Figura 68. Imagen del autor. Vista lateral PH

Figura 69. Imagen del autor. Pabellón final, solape 4 PHs

Figura 70. Imagen del autor. Pabellón final, ejes estructurales reglados de las superficies

Figura 71. Retrospección computacional. Menges. Menges, A. [Vinzenz Harrer GmbH]. (2022). Webinar Aufzeichnung "Zukunft Holzbau" [Video]. https://www.youtube.com/watch?v=n2z0xk9iZgk&list=PLBpTgOuUnOC_OVRh-JD0BM4ATSG6vqSWJT&index=1

Figura 72. Interpretación computacional superficie. ICD/ITKE University of Stuttgart (2019). ICD Research Buildings / Prototypes Bundesgartenschau Heilbronn, Germany. BUGA Wood Pavilion 2019. <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/buga-wood-pavilion-2019/>

Figura 73. Diagrama módulos Wood Pavilion 2019. ICD/ITKE University of Stuttgart (2019). ICD Research Buildings / Prototypes Bundesgartenschau Heilbronn, Germany. BUGA Wood Pavilion 2019. <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/buga-wood-pavilion-2019/>

Figura 74. Diagrama módulos Wood Pavilion 2019. Menges, A. [Vinzenz Harrer GmbH]. (2022). Webinar Aufzeichnung "Zukunft Holzbau" [Video]. https://www.youtube.com/watch?v=n2z0xk9iZgk&list=PLBpTgOuUnOC_OVRh-JD0BM4ATSG6vqSWJT&index=1

Figura 75. Imagen del autor. PH con superficie estética

Figura 76. Imagen del autor. Modelo reinterpretación modular.

Figura 77. Imagen del autor. PH resultante, superficie compuesta por módulos reinterpretados

Figura 78. Imagen del autor. Vista frontal PH reinterpretado

Figura 79. Imagen del autor. Vista lateral PH reinterpretado

Figura 80. Imagen del autor. Vista frontal pabellón resultante, 40x40m

Figura 81. Imagen del autor. Vista superior pabellón resultante, 40x40m

Figura 82. Imagen del autor. Vista perspectiva pabellón resultante, 40x40m

Figura 83. Imagen del autor. Vista aérea, integración pabellón propuesto de 20x20m en los Viveros de Valencia

Figura 84. Imagen del autor. Vista peatón, integración pabellón propuesto de 40x40m en cauce del Turia

Figura 85. Imagen del autor. Vista aérea, integración pabellón propuesto de 40x40m en cauce del Turia.

Figura 86. Diagrama UE, economía circular. <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20151201ST005603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>

Figura 87. Logos Objetivos de Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>