



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
ARQUITECTURA**

**Técnicas de diseño computacional y
fabricación robotizada en pabellones efímeros**

Tesis que para optar por el grado de Doctor en
Arquitectura presenta:

Mtro. Christian Martínez Mendoza

Directora: Dra. Geneviève Lucet

Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM

Comité tutor: Dr. Iván San Martín Córdova

Centro de Investigaciones en Arquitectura, Urbanismo y
Paisaje (CIAUP), UNAM

Dr. Peter Krieger

Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM

Sinodales:

Dr. Ignacio Borrego Gómez-Pallete
Technische Universität Berlin. Fak.VI Institut für Architektur

Dr. Mauricio Enrique Reyes Castillo Centro de
Investigaciones de Diseño Industrial, Facultad de
Arquitectura, UNAM

Ciudad Universitaria, CD. MX, diciembre 2022.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Índice

Introducción.....3

Cap. 1. Del tintero a los algoritmos: revolución computacional

arquitectónica.....18

- Los brazos robóticos industriales en la arquitectura.....26
- Materialidad Digital.....31
- Los ecos de Semper en los sistemas edificatorios del S. XXI.....37

Conclusión.....44

Cap. 2. Encofrados flexibles 3D para membranas de hormigón.....46

- Encofrado textil 3D antifunicular para membrana de hormigón anticlástica.....62
- Losas inteligentes (Smarts slabs).....73
- Encofrados flexibles 3D para losas inteligentes.....78
- Encofrado de arenisca 3D para losa inteligente.....83
- Encofrado Furan Direct Binding.....87
- Encofrado de losas hormigonadas antifuniculares.....94
- Conclusión.....98

Cap. 3. Morfogénesis computacional: La naturaleza como modelo arquitectónico.....	103
• Membranas biomiméticas de madera segmentada: del ebanista finisecular al artesano computacional.....	114
• Flexión activa: Fabricación textil para membranas de madera...	123
• Toroide de arcos restringidos de madera laminada a flexión activa.....	133
• Casetones textiles de madera a flexión elástica.....	142
• Homeostasis: Sistema estructural de madera autoconformada a flexión activa.....	151
• Sistema poligonal de madera para membranas anticlásticas.....	159
• Conclusión.....	173
Cap. 4. Devanado robótico de filamentos poliméricos de vidrio y carbono.....	181
• Membranas anticlásticas.....	193
• Sistema modular poliédrico de doble capa de filamentos poliméricos.....	199

- Fabricación aéreo-robótica: tejido multicapa para membrana monocasco en cantiliver.....207
- Devanado aéreo-robótico de filamentos sin núcleo.....211
- Membranas sinclásticas.....219
- Compuestos estructurales tubulares para membrana sinclástica.....227
- Conclusión.....237

Consideraciones finales.....239

Apéndice.....247

Bibliografía.....252

Lista de figuras.....262

Resumen

En el periodo transicional entre los siglos XX y XXI inició del vínculo de la tecnología digital con la arquitectura, particularmente gracias a la diversificación en programas de diseño. Posteriormente, debido a la incorporación de maquinaria CNC y brazos robóticos en determinados institutos de arquitectura, se han logrado codificar técnicas constructivas de diseño computacional y fabricación robotizada (TDCFR). El diseño arquitectónico migró de la gráfica hacia la fabricación robotizada en dos décadas.

Estas nuevas técnicas han reconfigurado la relación entre diseño y construcción, vislumbran además alteraciones graduales pero profundas en la práctica arquitectónica de un futuro casi inmediato al superar la simple creación de formas bellas o de una concepción estilística novedosa. Aunque las TDCFR inciden directamente en los esquemas morfológicos, su concepción se encuentra estrechamente relacionada con soluciones constructivas funcionales, ya que estas tendencias formalistas hiper orgánicas son el resultado de procesos de optimización geométrico/topológico. El análisis de las trayectorias de las cargas para derivar formas estructurales más ligeras y de mayor resistencia conlleva al axioma: La forma sigue a la optimización.

Las geometrías complejas no es la meta en sí, en cambio, el objetivo es habilitar nuevas posibilidades constructivas y por ende, repercutirá en aspectos morfológico/estructurales.

A partir del momento en los que los programas de diseño ampliaron sus capacidades y la maquinaria CNC, así como los brazos robóticos apoyaron la fabricación de distintos elementos arquitectónicos, surgió un universo de nuevas posibilidades formales gracias al desarrollo de diversas técnicas constructivas. Los cambios ocurridos con esta amplia gama de herramientas

y experimentos constructivos han aportado a la arquitectura un caudal de metodologías de fabricación, de las cuales resultan en su mayoría volúmenes orgánicos.

Las prácticas constructivas tardo góticas, particularmente las relacionadas con las bóvedas de cantería, han repercutido en el desarrollo de losas de entrepiso y membranas de concreto armado. Por otro lado, las técnicas en madera y fibras poliméricas de vidrio y carbono se han permeado de procesos de transferencia biológica.

Estas técnicas experimentales se han arraigado en estructuras efímeras a través de un enfoque de cooperación transdisciplinar que permite que herramientas tecnológicas ofrezcan soluciones innovadoras a viejos problemas. Los procedimientos constructivos han encontrado inesperados senderos, cuando la interacción humano-máquina, máquina-máquina es un hecho innegable.

Este trabajo muestra el progreso generado a través de la vinculación entre materiales, tecnología y formas arquitectónicas. Además de reflexionar respecto al nexo ineludible entre los avances tecnocientíficos y técnicas constructivas mediante el análisis de distintos proyectos efímeros, los cuales sirven de sustento para adentrarme en sus sistemas edificatorios.

Introducción

¿Cómo pueden los avances tecnocientíficos, particularmente en el área robótico-computacional, incrementar sus oportunidades y generar nuevos enfoques para la fabricación en arquitectura de tal modo que amplifiquen nuestra forma de diseñar y edificar?

La conjunción entre el material, forma, diseño y técnica constructiva se sintetizan en la MD, ello ha trastocado la manera de proyectar y edificar y por tanto se presume que el arquitecto poseerá un control absoluto de su obra. Así queda fragmentada la teoría de Alberti en la cual sentencia una separación rotunda entre arquitectos y constructores. Nos encontramos frente a un cúmulo de inéditas facultades proyectuales- constructivas, las cuales impulsan una plasticidad muy particular, sin embargo ¿estas transformaciones incidirán en la manera de construir a nivel industria?

Las formas y espacios arquitectónicos novedosos que se alejan de los cánones racionalistas han sido un tema reiterativo en nuestra profesión. En seguimiento a este argumento cabe resaltar que, un detonador importante para el panorama que se aproximaría fue la publicación de la revista *Architectural Design* en su edición de 1993 titulada *Folding in Architecture*, puesto que representó un cambio en la manera de concebir y proyectar. Ello significó un hecho paradigmático en la historia de nuestra disciplina al conglomerar una serie de posturas respecto a lo digital en arquitectura.

El respaldo de estas propuestas fue el texto de Gilles Deleuze “El pliegue: Leibniz y el Barroco”¹, en donde se examina al pliegue como elemento constante en todos los periodos histórico-artísticos, el cual alcanza su cumbre en el barroco. En dicho escrito, Deleuze reinterpretó la obra de

¹ Deleuze Gilles. *El pliegue: Leibniz y el barroco*. Edit. Paidós Ibérica, 2013.

Leibniz, al considerarlo como un autor esencial y argumentó que sus escritos están caracterizados por un elemento capital reiterativo: la curva.

En esa misma línea, Greg Lynn, consiente del cambio radical que iniciaba *Folding in Architecture*, aseveró que el punto clave de esas posturas teóricas fue su recopilación justo en el momento previo a que la tecnología digital permeará en la praxis arquitectónica. En su ensayo *Curvilinealidad Arquitectónica. Lo plegado, lo flexible y lo supletorio*², alentó a transitar formalmente de lo angular a lo curvilíneo, a distanciarse de la geometría euclidiana para adentrarse en elementos topológicos con el uso de NURBS (non-uniform rational B-spline). Aparentemente uno de los objetivos durante este periodo gestador de la futura revolución computacional era alejarse de la ortogonalidad cartesiana. Ello derivó en el interés por el desarrollo de equipamiento CNC³:

...la fascinación que generaron las experimentaciones con el CAD durante los años 1990, respondía a la seducción de poder trabajar con formas curvilíneas digitalmente, difícilmente podrían lograrse sin lasherramientas de diseño en tanto que el ordenador permite trabajar con flujos geométricos que generan “deformaciones volumétricas y superficiales [que] adquieren una especie de evidencia inasequible a los sistemas de representación gráficos tradicionales.”⁴

² Lyn, Greg, *Curvilinealidad Arquitectónica. Lo plegado, lo flexible y lo supletorio*, 1993.

³ Sistema de automatización de máquinas de Control Numérico por Computadora, operadas mediante comandos programados en un medio de almacenamiento para la fabricación arquitectónica.

⁴ David Humberto Abondano Franco, “De la arquitectura moderna a la arquitectura digital: La influencia de la revolución industrial y la revolución informacional en la producción y la cultura arquitectónica”. (Tesis doctoral inédita, Universitat Ramon Llull, 2018), 22.

Folding in Architecture anticipó las soluciones que serían capaces de ofrecer los ordenadores, sin embargo, aún después de su publicación fue imposible realizar traducciones materiales de estos proyectos, que en muchos casos emulaban las formas hiper orgánicas de la naturaleza. Todo ese material, según Alejandro Zaera-Polo se quedaba en un “limbo digital arquitectónico”, una “arquitectura virtual” en “un mundo paralelo inmaterial”.⁵ Es decir que, hasta este punto, las formulaciones de diseño alejadas de la ortogonalidad cartesiana no podían traspasar el umbral virtual:

Para revertir esta situación Zaera-Polo propuso aplicar las tecnologías digitales como medios de materialización o síntesis más que como soportes de un discurso teórico:

No nos interesa la arquitectura virtual, sino lo virtual de la arquitectura. La materialidad es finalmente una condición necesaria de la arquitectura [...] No trabajamos con discursos sino con materialidad, porque la arquitectura no se genera a través de un discurso teórico que después se materializa [...] Lo que tratamos de explorar con estos medios [digitales] no es la posibilidad de generar un mundo paralelo inmaterial, sino la posibilidad de poner en un mismo plano materiales distintos de manera que puedan producir un ensamblaje híbrido entre ellos⁶.

Con la década digital iniciada en 1990, la arquitectura experimentó un creciente interés por la incorporación integral de las tecnologías computacionales al diseño. Pero el verdadero cambio ocurrió cuando más allá de poder diseñar formas curvas orgánicas, las cuales Mario Carpo

⁵ *Ibíd.*

⁶ Alejandro Zaera-Polo. En: De la arquitectura moderna a la arquitectura digital: La influencia de la revolución industrial y la revolución informacional en la producción y la cultura arquitectónica. David Humberto Abondano Franco. (Tesis doctoral inédita, Universitat Ramon Llull, 2018), 34.

denominó “arquitectura de pliegues”, pliegues que constituían la figura arquetípica y fundacional de la plástica arquitectónica de la era digital”⁷ fue posible su materialización física debido al uso de maquinaria CNC.

En la línea de lo dicho, como aportaciones a la arquitectura actual, programas colaborativos entre arquitectos emergentes o consolidados y equipos multidisciplinares han impulsado el desarrollo de inéditos sistemas constructivos. Tal situación ha incentivado a estos equipos a dejar de aplicar el riguroso trazo arquitectónico que comprendió la modernidad para lograr proyectos más integrales como testimonios que son de la experimentación teórico proyectual. De esta manera se impulsa un vocabulario singular de formas y sistemas espaciales no ortogonales, de geometrías no euclidianas, de tramas estructurales concatenadas y curvas, ello a la vez, redefine la tectónica con desarrollos imposibles de ser materializados mediante sistemas de diseño y construcción racionalistas.

A la cabeza de estos progresos se encuentran The Institute of Technology in Architecture y The National Centers of Competence in Research (NCCR) pertenecientes al Departamento de arquitectura la ETH de Zürich, con sus investigaciones sobre concreto armado. En aras de fundamentar los procesos constructivos robotizados en hormigón, es importante apuntar, por un lado, a las prácticas de abovedamiento tardo-góticas. Aun cuando llevamos más de un siglo explorando las expresiones plásticas/estructurales de este material, recientemente se detectó que novedosas morfologías están definidas por la optimización topológica. En dicho sentido, la ETH Zürich ha detonado una experimentación que abarca una serie de elementos constructivos como columnas, muros, losas de entrepiso y membranas.

⁷ Mario Carpo. Ten Years of Folding. Oxman, R. & Oxman, R. *Theories of the Digital in Architecture*. (London: Routledge, 2014), 37.

Por otra parte, a partir de 2010, ICD/ITKE⁸ pertenecientes a la Universidad Técnica de Stuttgart, ha edificado anualmente una serie de pabellones con técnicas de manufactura robotizadas. Procesos biológicos adaptativos de ciertos organismos fundamentan su desarrollo, en tanto que las generosas aportaciones de la naturaleza han sido un mentor infalible para generar inéditas metodologías de diseño.

El personaje clave en este itinerario es Frei Otto, quien con sus contribuciones a partir de 1950 ha resonado en la historia de la arquitectura gracias a su exploración entre técnica constructiva y naturaleza. El diseño arquitectónico mediante observaciones de fenómenos como las redes neuronales, los habitáculos de las termitas, los radiolarios y diatomeas, presenta un fuerte componente experimental, cuyos resultados como procesos de autogeneración de formas posibilitan un acercamiento insólito al desarrollo de nuevas morfologías arquitectónicas. Las propuestas de Otto, a diferencia de muchas otras como las obras de Archigram o las del neofuturista Jan Kaplický e incluso los incipientes planteamientos de Zaha Hadid, pudieron materializarse en obras arquitectónicas emblemáticas gracias entre otras cuestiones a las analogías biológicas, así como al cálculo computacional en una etapa muy temprana, tanto del proyecto mismo como en la historia de la arquitectura.

Estos centros de investigación han logrado generar importantes reflexiones teóricas, pero sobre todo han producido obras arquitectónicas con adelantos técnico-constructivos basados en investigaciones sobre programación en el diseño y manufactura robotizada. Sus aportaciones son traducidas físicamente en una estructura con carácter circunstancial. Tal hecho favorece una experimentación poco frecuente en nuestra disciplina al

⁸ (ICD) The Institute for Computational Design and Construction.
(ITKE) Institute of Building Structures and Structural Design.

desprenderse de las limitantes impuestas por el programa y el partido.

Los pabellones son a las exposiciones lo que los experimentos a los laboratorios...Dado que la “singularidad efímera” de los pabellones invita a innovar, a asumir riesgos y, en consecuencia, a indagar en la experimentación con los materiales, algunos de estos proyectos han explorado, incluso bordeando el vértigo, los límites estructurales, constructivos y conceptuales de este material.⁹

Dichas estructuras efervescentes operan como maquetas a escala 1:1, sondean metodologías proyectuales-constructivas de enorme potencial, para que finalmente sus hallazgos se introduzcan como posibles nuevas soluciones de diseño y edificación:

Los pabellones son particularmente adecuados para este tipo de investigación porque en su función de estructuras temporales, brindan la oportunidad de enfatizar preguntas específicas sin tener que cumplir con toda la gama de requisitos funcionales y estructurales y las demandas de los edificios. De esta manera, es posible probar hipótesis y los hallazgos se pueden utilizar en el diseño de edificios permanentes¹⁰.

En tanto que existen numerosos *FabLabs*¹¹ alrededor del mundo se han incorporado sesgadamente brazos robóticos en laboratorios exprofeso para

⁹ Enrique Jerez Abajo, “Hormigones efímeros: el caso de los pabellones españoles”. *BLANCO revista de arquitectura* N° 17 (2015): 102, doi: 10.4995/eb.2015.5744

¹⁰ Jan Knippers, Ulrich Schmid y Thomas Speck, *Biomimetics for Architecture: Learning from Nature*, (Basilea: BIRKHÄUSER, 2019), 17.

¹¹ Espacios para la fabricación computacional de objetos mediante máquinas de Control Numérico Computarizado (CNC), cuyo origen deriva del Center Bits and Atoms del MIT, un proyecto colaborativo con Grassroots Invention Group sobre el mundo virtual y material, fundado por Neil Gershenfeld.

la construcción, las escuelas de arquitectura mantienen invariables sus enseñanzas, los materiales educativos son poco propicios para el aprendizaje que la tecnología actual ofrece.

Así mismo, la formación moderna de nuestros profesores hace inviable el deseo por experimentar la transformación técnica de materiales y sistemas constructivos mediante diseño computacional y fabricación robótica. La instrucción de los arquitectos se ha mantenido desfasada de las metodologías de fabricación robotizada, por tanto, los preceptos arquitectónicos contemporáneos estaban desactualizados dado que la arquitectura se había mantenido estancada en las técnicas constructivas vigesimonónicas. Superar dicha situación es un tema clave en las nuevas direcciones que tomará la industria de la construcción.

Los vínculos entre programas de diseño, maquinaria CNC, brazos robóticos y arquitectura, particularmente en los institutos de educación superior; han logrado el desarrollo de inéditas **Técnicas de diseño computacional y fabricación robótica**. Desafortunadamente, la práctica predominante en los sistemas constructivos robotizados está principalmente enfocada en estrategias formales. Estos volúmenes hiper orgánicos carecen de una comprensión profunda respecto a cómo estos esquemas morfológicos están vinculados con soluciones constructivas de optimización geométrica/topológica:

...La optimización estructural es un proceso inverso en el que los parámetros se optimizan implícita o indirectamente para encontrar la geometría de una estructura de modo que se minimice una función objetivo o un criterio de aptitud...La topología de la estructura se define por la conectividad de los nodos en la estructura y la existencia o ausencia de elementos¹².

¹² Sigrid Adriaenssens, Philippe Block, Diederik Veenendaal y Chris Williams.

La arquitectura actual enfrenta retos similares a los siglos XIX y XX respecto a la aceptación e incorporación de inéditas metodologías de diseño y construcción como fueron los casos del acero y el concreto armado respectivamente. El sector de la edificación ha mantenido invariables sus sistemas constructivos desde la plena incorporación del hormigón a la industria. Pese a que existe una amplia variedad en programas de diseño e incontables *plug inns*, avances en maquinaria, materiales poco comunes en la arquitectura como la fibra de carbono y vidrio, la industria adolece de progreso en sus sistemas constructivos.

Por ello, al tener en cuenta que el empleo de la tecnología computacional y brazos robóticos no ha superado la generación de formas complejas, este trabajo explorará el potencial de la arquitectura programada computacionalmente y su manufactura robotizada, más allá de lo puramente formal. En este sentido, las técnicas edificatorias son inherentes con el material utilizado. Los encofrados textiles corren en paralelo con el concreto armado. Mientras que la madera se conjunta con la flexión activa, al igual que los sistemas estructurales poligonales. Finalmente, el devanado robótico de filamentos se desarrolla con fibras poliméricas de vidrio y carbono.

Las investigaciones de ambos institutos se distancian tanto en términos proyectuales/constructivos como formales del estilo internacional. Las técnicas logradas han detonado un profundo interés en centros académicos y laboratorios que han encausado sus estudios a este campo poco aprovechado en la arquitectura.

El apogeo de estas metodologías en la actualidad ha incitado a que institutos de arquitectura e ingeniería se vinculen y con la inclusión de brazos

Shell Structures for Architecture Form Finding and Optimization, 4.

robóticos industriales¹³, desarrollen técnicas de diseño robótico-computacional, las cuales nos llevan a una actualidad con tales puntos de innovación que demandan solapes con otras disciplinas tales como la ingeniería de materiales, la biología, la programación y desde luego la robótica, por lo cual, también se ha diversificado el campo laboral de los arquitectos al requerir profesionistas con un nivel disciplinar único. Se han desarrollado nuevos métodos de programación computacional para proyectos arquitectónicos no estandarizados. La robotización en técnicas constructivas se posiciona como una alternativa viable, eficaz y capaz de perfeccionar los resultados de la mano de obra sin costos adicionales, a la vez que se optimizan recursos materiales a través de la dupla hombre/brazo robótico.

Las TDCFR constituyen un importante referente para entender el recorrido de la arquitectura hacia un nuevo periodo, pese a ello, la llegada de nuevas metodologías de diseño y construcción son una preocupación menor que se identifica mucho más con el sector académico. En virtud de lo señalado, **en este texto discurre la preocupación sobre:**

1. ¿Cuáles son las aportaciones e impactos del diseño programado computacionalmente y la fabricación robotizada en el corpus arquitectónico?
2. ¿Es sólo la exigencia de generar un nuevo lenguaje plástico, una mera fascinación visual que empuja a la investigación arquitectónica a beneficiarse de estas técnicas?

¹³ Herramientas automatizadas reprogramables para realizar las más variadas tareas, han tomado el lugar de los utópicos humanoides y son capaces de llevar a cabo una enorme cantidad de cometidos constructivos.

Como respuesta a estos cuestionamientos, **se presentan las siguientes hipótesis:**

1. Las técnicas que incorporan *softwares*, como herramientas para programar, brazos robóticos y maquinaria CNC como instrumentales edificatorios aportan soluciones formales que resultan de procesos de optimización geométrico/topológica.
2. La optimización impulsa un nuevo lenguaje arquitectónico, encausado a través de técnicas constructivas que han propiciado una ruptura en la concepción, creación y morfología arquitectónica

Esta investigación se fundamentó en el desarrollo en primera instancia, de los avances de la tecnología CAD/CAM/CIM¹⁴ y la incorporación de brazos robóticos a la disciplina. Debido a que algunos arquitectos aún mantienen técnicas de proyectación y construcción, embebidas en la tradición modernista del S. XX, juzgo que este texto resulta idóneo para ahondar en el conjunto de transformaciones que los procesos constructivos robótico-computacionales abrazan.

Mediante el uso y adecuación de la tecnología, el futuro empuja a la arquitectura a ofrecer proyectos que implementen determinadas técnicas de edificación. Sin embargo, el reto no está en innovar formalmente, se encuentra en la modificación de patrones constructivos que preparen los escenarios actuales para la oferta de un abanico de posibilidades que realmente sean capaces de provocar una nueva tendencia edificatoria en la arquitectura.

¹⁴ CAD (Computer Aided Design). CAM (Computer Aided Manufacturing). CIM (Computer-Intergrated Manufacturing)

El alcance de mi investigación es exploratorio, ya que indagué en un problema poco abordado en la arquitectura. Al concluir este trabajo pretendo que mis alcances sean correlacionales, ya que explicaré las causas de los fenómenos, así como un posible porvenir. Mi propósito es ofrecer un panorama particular de determinadas técnicas edificatorias, del mismo modo que se muestra la enorme variedad de recursos y equipamiento en herramientas que posibilitan estas estrategias de diseño y edificación.

De este modo, los **objetivos generales** que aquí se pretendió alcanzar, buscan:

- Desglosar el proceso de gestación de las técnicas constructivas, a la vez que se muestra su potencial aplicación en proyectos arquitectónicos.
- Evidenciar que las estructuras efímeras como recipientarias de los inéditos sistemas edificatorios han sido un importante detonador de los avances experimentados por la arquitectura en la prefiguración de nuevos sistemas constructivos.

Basado en los objetivos generales, se establecieron temas de investigación hacia los cuales confluyen, a su vez, **objetivos específicos**:

Analizar las obras desarrolladas con TDCFR a partir tres categorías disciplinares o variables fundamentales que faciliten un enfoque arquitectónico:

- . Proceso de investigación sobre materiales, softwares y prototipos.
 - . Planificación y diseño computacional integrativo y fabricación robótica.
 - . Logros técnico-constructivos.
- Indagar en el motor de innovación, así como el potencial de las TDCFR con respecto a las interrelaciones entre sus sistemas estructurales, morfológicos y de fabricación.

- Emitir un juicio crítico a través de argumentos reflexivos al pie de cada obra, en torno a las aportaciones metodológico-constructivas, contenidos morfológicos, funcionalidad, desempeño estructural, desarrollo ejecución material y calidad proyectual.

Modelo teórico-metodológico

A efecto de resolver metodológicamente los planteamientos establecidos en este trabajo, así como para entender los procesos totales de creación y materialización, realicé una revisión dialógica que me permitió formular una visión ordenada de los diversos contenidos en los proyectos, a efecto de emitir un juicio acerca de sus respectivas aportaciones a la arquitectura. Es conveniente precisar que esta tesis se trata de **un proyecto de investigación de naturaleza teórico-crítica y de carácter analítico-descriptivo.**

Dado las aportaciones de las técnicas constructivas seleccionadas, esta tesis contribuye con resultados que complementan y amplían los conocimientos actuales sobre el acontecer edificatorio. La elección de los pabellones se sustentó en proyectos arquitectónicos que muestran el proceso de diseño, así como el resultado de aplicar TDCFR. Más allá de la disparidad existente entre las obras presentadas, se atisba una cierta congruencia y continuidad entre ellas, como sus constantes conceptuales, materiales, formales, de proyectación, pero sobre todo en términos de fabricación en las que siempre aparecen vinculadas.

Las técnicas edificatorias que aportan arquitecturas exclaustradas de la ortogonalidad más pura obedecen a la optimización geométrica/topológica, lo cual conlleva a construcciones ligeras o exoesqueletos performativos. En dicho sentido, los elementos constructivos con una cantidad inferior de material respecto a sus homólogos dependen de la deposición del material

en los puntos exactos que se requiere.

Tanto los autores y sus campos de investigación, como la bibliografía mencionada al final de este texto, documentan que el S. XXI cuenta ya con algunos estudios sobre la conciliación entre formas y principios inspirados en la naturaleza, herramientas computacionales, sistemas robóticos y arquitectura. Dado la velocidad y proliferación con que surgen teorías que impactan en la arquitectura, encontramos que algunas posturas ya han sido abandonadas, algunas están en debate, mientras que otras más emergen, por lo cual, a efecto de resolver el problema de investigación, tomé los registros teórico prácticos generados a partir del año 2000 como **marco teórico**.

Particularmente me enfoqué en investigaciones realizadas por ETH Zürich e ICD/ITKE, ya que ambas instituciones representan la vanguardia respecto a la creación de sistemas constructivos robótico/computacionales.

Sin embargo, en esta conjunción también destacan ejercicioexperimentales efímeros como los que se realizan para la SerpentineGallery, el MOMA PS1 o las ferias arquitectónicas de institutos de educación superior como The Bartlett School of Architecture, The London School of Architecture, The Southern California Institute of Architecture, Instituto de Arquitectura Avanzada de Cataluña – IAAC - entre muchos más.

Igualmente consulté el trabajo de The Architectural Association Design Research Laboratory (AADRL), así como textos especializados que distintas asociaciones en E.E.U.U y Europa publican como parte de sus congresos - generalmente anuales – como son ECAADE, - Education in Computer Aided Design in Europe - ACADIA - Associationfor Computer Aided Design in Architecture – y Fabricate, también ASCAAD o DADA: Digital Architecture Design Association, con base enChina. También es importante citar a SIGraDi - Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital -,

una organización surgida en 1997, que organiza un congreso anual para debatir las aplicaciones y posibilidades de las tecnologías gráficas y los nuevos medios digitales, así como CAADRIA - Computer Aided Architecture Design Research In Asia - es una de las cuatro organizaciones fundadoras del International Journal of Architectural Computing (IJAC).

En el engrosamiento del cuerpo teórico, han surgido de manera sorprendentemente veloz y prolífica organizaciones relacionadas, como son CAAD Futures: CAAD Future Foundation, Smartgeometry(SG), Advances in Architectural Geometry (AAG) o el Design Modelling Symposium, Berlín 2011 y 2013 y Copenhagen 2015. También han sido fuente de estas investigaciones revistas como Architectural Design (AD), que a partir de los años 90 se ha dedicado a tratar temas relacionados al quehacer arquitectónico en temas digitales y robóticos. En el mismo sentido visionario, pero con miras mucho más utópicas, la publicación periódica Studio air se ha centrado en prácticas emergentes arquitectónicas y disciplinas afines. Editoriales dedicadas exclusivamente a publicaciones sobre arquitectura y diseño como Princeton Architectural Press, -1981- la catalana ACTAR, y su *boogazine* -1994- o Routledge, de la editorial Taylor & Francis Group, abordan los desarrollos arquitectónicos pertenecientes a la era de la computación.

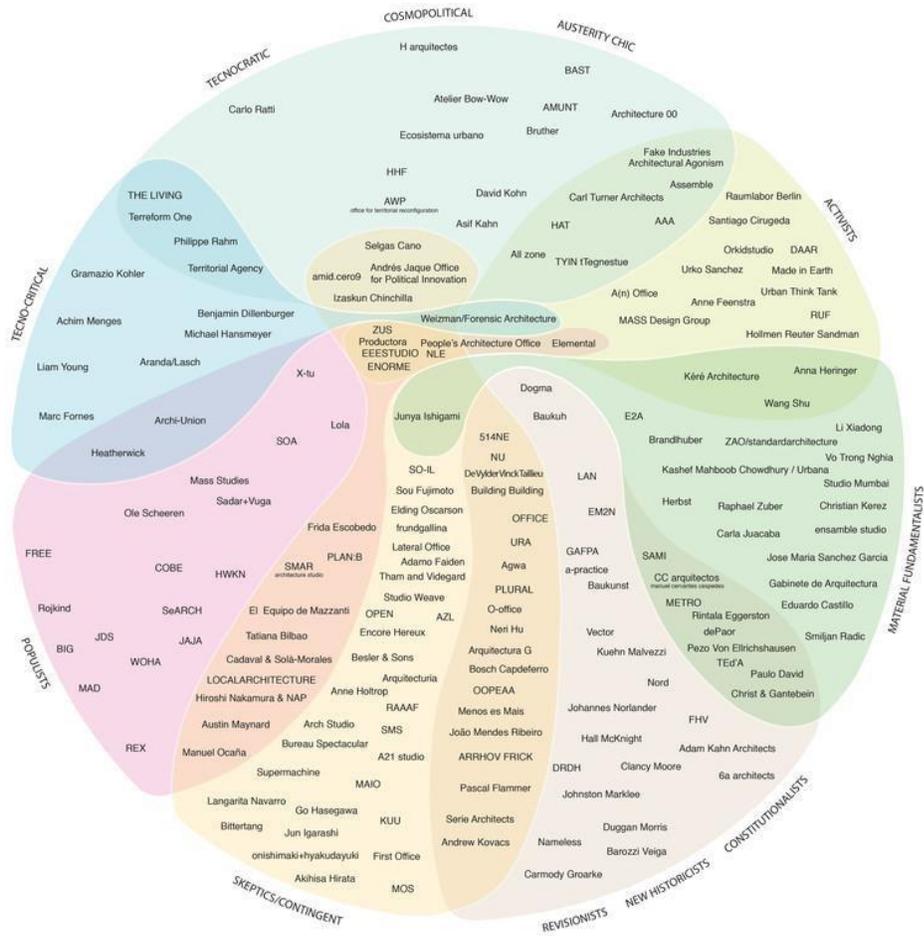


Fig. 1. "La brújula política de la arquitectura: una taxonomía de la arquitectura emergente en un diagrama."

Cap. 1 Del tintero a los algoritmos: Revolución computacional arquitectónica

La computación está redefiniendo la práctica de la arquitectura. Esta puede amplificar la capacidad de un diseñador para considerar simultáneamente múltiples opciones, conectar a grandes bases de datos, analizar diseños en relación con diversos parámetros de desempeño, crear sus propias herramientas de diseño y a través de la **fabricación digital y montaje robótico**, participar en los procesos de construcción de edificios.¹⁵

Las Revoluciones Industriales conllevan profundas transformaciones debido a los enormes avances tecnológicos que le han reportado a la historia de la humanidad. De acuerdo con Thomas S. Kuhn una revolución científica se reconoce cuando los antiguos paradigmas son reemplazados por otros nuevos e incompatibles. Ahora incursionamos en la siguiente fase de una expansión tecnológica drástica que conlleva profundas transfiguraciones las cuales acarrearán desarrollo y progreso. Esta etapa representada por la revolución computacional se caracteriza por la incursión de la tecnología en todos los aspectos de la vida cotidiana incluida también la arquitectura.

La Segunda Guerra Mundial fue un asunto decisivo para que la tecnología permeará en áreas ajenas a ella, por ejemplo, la producción en masa para el ensamblaje de piezas fue un punto clave para los arquitectos en esta época:

¹⁵ Brady Peters, *Diseñando el Futuro: Arquitectura simulación y computación*. Seminario internacional de arquitectura 2016. The Digital Reveal. Arquitectura de la era Post-Digital. (Colombia: Universidad Piloto de Colombia, 2016) edición en PDF, cap. 1.

Ron Herron, conoció la prefabricación de los productos de la Royal Air Force durante su servicio militar. Reynner Banham ejerció de aprendiz en la Bristol Aeroplane Company, compañía que producía 54.000 viviendas AIROH (Aircraft Industry Research Organization on Housing) de aleación ligera. Charles Eames diseñó prototipos industriales –muebles, tablillas de contrachapado para rigidizar las piernas heridas para la marina estadounidense. Jean Prouvé desarrolló sistemas prefabricados de alojamiento en Francia, mientras que Buckminster Fuller haría lo propio en los Estados Unidos para la Beech Aircraft Corporation con la Wichita House.¹⁶

Este periodo fue crucial para el surgimiento de los sistemas de diseño asistido por computador (*Computer Aided Design*, CAD). The Massachusetts Institute of Technology (MIT) se benefició enormemente con fondos federales para el desarrollo de tecnologías cuyo objetivo era la “automatización, optimización, estandarización y producción masiva de armas bélicas. Uno de sus fines era demostrar que la tecnología mediante la computación podía optimizar la creación de armamento. Gracias a investigaciones en diseño computacional, disciplinas como la arquitectura pueden hacer uso de los algoritmos, los cuales se definen como:

...una secuencia de instrucciones que, procesadas devienen en un listado infinito de opciones para resolver determinados problemas. Es un proceso tripartito donde primero el diseñador introduce y codifica los datos necesarios (input), segundo, el

¹⁶ Eduardo Roig Segovia. “El Entorno Aumentado. Imperativo informacional para una ecología digital de lo arquitectónico”. (Tesis doctoral inédita, Universidad Politécnica de Madrid, 2014), 59, https://oa.upm.es/cgi/oai2?verb=GetRecord&metadataPrefix=oai_dc&identifier=oai:oa.upm.es:25540

programa ofrece una serie ilimitada de respuestas (output), y tercero, el arquitecto escoge la opción óptima para formalizar su propuesta.¹⁷

Fue con la tesis doctoral de Iván Sutherland en ingeniería eléctrica en el MIT en 1963, Sketchpad: A Man-Machine Graphical Communications System que dio pauta para el surgimiento del CAD, al desarrollar la primer interfaz gráfica con una pantalla en la que además de poder dibujar tanto horizontal como verticalmente puntos, líneas rectas y curvas mediante un lápiz, se podía dimensionar, copiar, mover, girar, almacenar, borrar, e incluso guardar los archivos gráficos.

Por otra parte, Leslie Martin fundó en 1967 el Land Use and Built Form Studies (LUBFS) en Cambridge, en donde uno de sus objetivos principales fue indagar en las transformaciones en el diseño arquitectónico con el uso de las novedosas prácticas computacionales en espacios virtuales. Mientras tanto, Nicholas Negroponte ofrecía una visión liberadora a los arquitectos a través de una propuesta visionaria en la cual se integraba a las máquinas en quehaceres cotidianos en su publicación en 1969 de *Towards a Humanism through Machines*, la cual además fungió como base para la posterior creación del MIT Media Lab: “Construyamos máquinas que puedan aprender, que puedan andar a tientas, que puedan rebotar como balones sueltos, máquinas que sean compañeras del trabajo arquitectónico, máquinas de arquitectura”¹⁸

¹⁷ Juan R. Castillo Molina y Jacobo Arismendy, “ALGORITMO GENERATIVO. Sobre el uso de Herramientas y Procesos Digitales Sofisticados que Incentiven Nuevos Enfoques Académicos en la Arquitectura Dominicana” UNIBE Decanato de Innovación (2017), 1.

¹⁸ Nicholas Negroponte, “The Architecture Machine: Toward a More Human

Paralelo a la incorporación de los algoritmos en el espacio virtual arquitectónico y justo en los años de la posguerra, algunos arquitectos cuestionaron sus metodologías proyectuales, funciones y capacidades, entonces experimentaron con nuevos procedimientos que tenían como objetivo principal la editabilidad, se mecanizaban con ello ciertos procesos de trabajo. En este pensamiento utópico se pensaba que las computadoras podrían ser sustitutas del trabajo de los arquitectos, un juicio que se perfila en la misma dirección en esta época. Lo impensable era diseñar, calcular o construir – tal como lo hacemos en la actualidad - bajo el rigor de los programas computacionales.

Podríamos señalar además a Nicolas Negroponte, fundador y director del MIT Media Lab, laboratorio que desarrolla nuevas tecnologías para investigar la interfaz humano-computadora.

Paralelamente, Frei Otto sincretizó las funciones de los ordenadores con la arquitectura, cuando logró calcular computacionalmente sus proyectos a partir de 1965. En una de sus afirmaciones de mayor contundencia, emplea una analogía que sintetiza su pensamiento:

...puedo demostrar que se puede construir cualquier escultura. Calculo la escultura mediante ordenador y adapto sus dimensiones, grosores o armaduras de acero en el hormigón al cálculo estático resultante, es decir, no encuentro formas, sino que creo formas. El ordenador solo hace como si hubiera encontrado las formas... en el fondo, quien se ha sentado frente al ordenador las ha creado no encontrado¹⁹

Environment". (Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1973), 121.

¹⁹ Juan María Songel. *Frei Otto. Conversación con Juan María Songel* (Barcelona: Gustavo Gili, 2008), 40.

En 1960 John Holland abordó el uso de algoritmos generativos y evolutivos como un nuevo modelo para procesos de diseño al analizar los fenómenos de adaptación que ocurren en la naturaleza y con ello desarrollar los caminos para que estos mecanismos adaptativos pudieran ser importados a sistemas computacionales y a su vez, aplicarlos en sistemas tecnológicos para alcanzar formas arquitectónicas. Los **algoritmos evolutivos** son procedimientos para la resolución de problemas basados en las capacidades que posee la naturaleza para generacionalmente avanzar hacia organismos mayor y mejor adaptados en los ambientes que habitan.

En una línea de pensamiento similar, el trabajo de John Frazer en la Escuela de Arquitectura de la Architectural Association (AA) resulta clave para entender la arquitectura actual. El libro “An Evolutionary Architecture” plantea la relación de los procesos evolutivos y la arquitectura, a la que denomina arquitectura evolutiva, mientras que en “Adaptation in Natural and Artificial Systems” hace referencias a la computación evolutiva y la teoría de esquemas, las cuales se utilizan para desarrollar múltiples proyectos de algoritmos genéticos.

Kostas Terzidis, profesor de Harvard Graduate School of Design, En su libro *Algorithmic Architecture* (2006) denomina a la arquitectura algorítmica como **algotectura**. Su uso supone que determinados procesos computacionales pretenden emular las capacidades intelectuales humanas, con un amplio rango de cálculo y respuesta casi inmediata.

Posterior a los años noventa, los avances en computación causaron una inflexión drástica en el quehacer arquitectónico, ya se trabajaba en un mundo virtual 3D, puesto que:

“La aparición del espacio virtual supuso la primera revolución dentro de la era digital... los edificios dejaron entonces de ser dibujados y empezaron a ser modelizados en el espacio virtual, pudiendo resolverse geoméricamente de forma global.”²⁰

Los resultados de estas investigaciones fueron utilizados en la industria cinematográfica estadounidense en estudios como Universal. El *software* Creative Environment, - Softimage 3D - fue desarrollado primeramente en 1986 por el cineasta Daniel Langlois para la animación de personajes cinematográficos. Programas de diseño como Alias – 1983, Toronto, hoy MAYA - para producir representaciones 3D incorporó NURBS en CAD.

Rompiendo los cánones en la manera en que se diseñaba y construía a finales del S.XX, Frank Gehry utilizó el software CATIA (Computer-Aided Three dimensional Interactive Application, un programa desarrollado por Dassault Systèmes, para ser utilizado originalmente en la industria aeroespacial) para el diseño del Guggenheim en Bilbao y para el Walt Disney Concert Hall en Los Ángeles. Sus experiencias formales fueron tan alentadoras que, en 2002 el departamento I+D de su propio estudio, creó Gehry Technologies, como una firma paralela a su compañía, en la cual se investigaban los alcances y limitaciones de CATIA.

²⁰ Carlos L. Marcos Alba. “Dibujo no parametrizado: un no dibujo necesario en el E.G.A.”, *XIII Congreso Internacional EGA*, (Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2010), 394.

El uso de los algoritmos capaces de generar complejas estructuras formales, aportó la posibilidad de replantear las técnicas constructivas para el amalgamiento entre diseño con la fabricación. **La arquitectura de algoritmos recurre al uso de programas computacionales para explotar la regularidad de los patrones clásicos grecorromanos** y con ello generar variaciones iterativas de un modelo inicial.

Por otra parte, los arquitectos han manifestado su inspiración en las formas de la naturaleza, sus diseños han partido de patrones geométricos multi curvas, libres de las restricciones ortogonales. Estrategias de biodiseño pueden aplicarse en la arquitectura para con ello obtener **soluciones morfológicas optimizadas**. Ello obedece a principios matemáticos que son adoptados por esta tendencia e incorporados como un conjunto de reglas y procedimientos que inspiran la creación de lenguaje, mediante la discretización de un elemento en varias partes. De este modo, el arquitecto, cuyo rol consiste en proponer soluciones a determinados problemas, ahora puede decidir con base en una gama infinita de posibilidades programadas.

Hasta hace poco tiempo, las herramientas computacionales en las firmas de arquitectura se producían exclusivamente para experimentaciones formales. En la actualidad, las metodologías algorítmicas permiten la fabricación de formas de alta complejidad, alientan avances en temas de mayor envergadura, como son la integración del diseño computacional en términos como simulación y fabricación para construcciones altamente optimizadas tanto en diseño como en su construcción.

Hoy día sabemos que la conexión entre diseño computacional y fabricación robotizada permite al arquitecto visualizar y generar simulaciones con antelación. Así hemos transitado de los antiguos esquemas análogos a la fabricación robótico computacional con herramientas de optimización.

Los **algoritmos evolutivos** en arquitectura están cimentados gracias al uso de la **bio informática**, la cual propone soluciones a determinados problemas según parámetros previamente establecidos.

Actualmente, la automatización del diseño es una situación cotidiana. El algoritmo denominado Finch, una herramienta paramétrica que mediante una interfaz 3D con Grasshopper y Rhino genera plantas arquitectónicas de una manera presuntamente óptima, en función de una serie de parámetro tales como la superficie, material disponible, etc.

Los brazos robóticos industriales en la arquitectura

Si bien las prácticas de diseño arquitectónico han estado utilizando herramientas digitales durante más de 30 años, la construcción ha tendido a permanecer profundamente análoga.²¹

Lejos ha quedado el arquitecto como figura creadora de un todo. Gaudí, Mies, Aalto, Wright y muchos otros arquitectos producían una gama de diseños que rompían la frontera entre arquitectura y artes aplicadas, sin embargo, la complejidad de los proyectos, así como el progreso de la tecnología han propiciado que nuestra disciplina se enriquezca con visiones de otros oficios.

Gracias a la incorporación de un extenso catálogo de programas de diseño a los proyectos arquitectónicos en sus etapas tempranas de planeación, así como al vínculo con brazos robóticos industriales, ha surgido la fabricación robotizada con procesos que se dividen en dos categorías:

Sustractivos. Este método elimina material de un determinado sólido para conseguir ciertas características y componentes deseados. “Los procesos CNC engloban de manera general casi todas las tecnologías de construcción digital, ya que genera un sistema informático para generar instrucciones codificadas que a su vez controlan los movimientos de una máquina herramienta.”²²

Aditivos. Es un proceso de deposición material en capas sucesivas,

²¹ “SPACE10 anticipates the future of digital design and fabrication in architecture”, STIRworld, Acceso el día 20 de noviembre de 2017, <https://www.stirworld.com/see-features-space10-anticipates-the-future-of-digital-design-and-fabrication-in-architecture-2-2>

mediante un sistema de control numérico por computadora (CNC). La impresión 3D o fabricación aditiva permite la producción de elementos constructivos prefabricados o in situ. Es un proceso potencialmente prometedor en la producción de geometrías complejas topológicamente optimizadas.

Aun cuando el término robótica es increíblemente amplio, en este escrito será utilizado para hacer referencia a los brazos robóticos industriales que realizan un conjunto de tareas constructivas tradicionalmente llevadas a cabo por humanos. Estos robots de control automático, reprogramables y con variedad en disposición y número de ejes ejecutan múltiples encomiendas. Las capacidades del robot deben aumentarse por medio de dispositivos adicionales. Se podría denominar a estos dispositivos como los periféricos del robot; incluyen herramientas que se añaden a su muñeca y a los sistemas sensores que le permiten interactuar con su entorno.

En robótica, la expresión efector se utiliza para describir a la mano o a la herramienta que está unida a la muñeca del brazo en cuestión. Los efectores representan, imitan y superan a la mano humana en tareas de flexibilidad, velocidad, destreza y precisión. Son un elemento indispensable que tradicionalmente ha tenido forma de pinza, pero llegan hasta complejos sistemas de sensores personalizados con numerosas aplicaciones a las diferentes industrias. La cantidad y diversidad de efectores es sumamente extensa, abarca tantas opciones como las mismas demandas.

Básicamente un efector es el fin comercial del robot y funcionan con un abanico de *softwares* como es RoboDK. Sin entrar a detallar la variedad de modelos o proponer una clasificación, debe señalarse que KUKA es la marca más utilizada para desarrollar tareas

arquitectónicas. Estos robots industriales representan el arranque de una etapa en la cual, la tecnología es indispensable para la traducción física de los datos en aras de desarrollar sistemas constructivos.

Un cambio drástico para el porvenir de la fabricación surgió en 2005 cuando el Dr. Adrian Bowyer, un profesor en ingeniería mecánica de la Universidad de Bath en Reino Unido, fundó el Proyecto Reprap, una iniciativa de código abierto para construir impresoras 3D que se pudieran replicar. A partir de este punto, los nexos entre la arquitectura y la tecnología CNC han sido inseparables.

Conjuntamente con la incorporación CIM²² (Computer Integrated Manufacturing) este proyecto sentó las bases para utilizar maquinaria CNC en las técnicas constructivas. Incide en la industrialización de procesos más veloces, flexibles y técnicamente mucho más precisos; mientras que el uso de modelos volumétricos impresos computacionalmente posibilita revisar ciertas condicionantes: "...de comportamiento estructural (estabilidad estática, dinámica, conexiones, etc), físico (aislamiento acústico, térmico), ambiental (asoleamiento, disposición al viento), constructivo (elementos estructurales primarios, secundarios, revestimientos, secuencias de montaje, dimensión de piezas, etc)."²³

²² Esta metodología propuesta por el Dr. Joseph *Harrington*, en su libro "La manufactura integrada por computadora" formula el uso del cálculo y la enorme capacidad de procesamiento de los ordenadores para la producción de bienes.

²³ Rodrigo García Alvarado. "Fabricación digital de modelos constructivos: análisis de equipos y procesos." *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, n.º59, (2011), 149. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S012062302011000300014

Los adelantos tecnocientíficos aplicados a la arquitectura han repercutido en la creación de volumetrías innovadoras tendentes a emancipar el *formfinding*. Sin embargo, el desarrollo e implementación de nuevas TDCFR demuestra que las geometrías complejas son el resultado de la optimización que los procesos de búsqueda morfológica ligam al desempeño estructural y material, lo cual permite además procesos proyectuales y constructivos más holísticos que las técnicas tradicionales.

Esta constante representa la íntima relación entre forma y técnica constructiva. Aquí se unirán las correspondencias entre las creaciones arquitectónicas y la cientificidad de lo constructivo. El apropiamiento que la arquitectura ha hecho de algunas tecnologías ajenas a ella ha creado un corpus novedoso en la ideación, creación y construcción. Sus resultados físicos como verdaderas proezas utópicas, suponen un progreso no solo en nuestros diseños sino también en cómo construimos. Por otro lado, ponderar las TDCFR sobre el diseño formalista y tendencioso es una prioridad en los proyectos arquitectónicos analizados en este escrito, en tanto que son revolucionarios las técnicas constructivas y no las muestras morfogenéticas:

Frampton reconoció el potencial de las herramientas digitales para trabajar con materiales tradicionales de maneras innovadoras, así como su capacidad para llevar a cabo procesos estocásticos e iterativos en el diseño de estructuras altamente funcionales. Sin embargo, mantuvo su oposición a la manera en que estas

herramientas se estaban empleando para generar formas extravagantes que se convertían en un fin en sí mismas, obviando así la dimensión humana y social de la arquitectura.²⁴

El amplio despliegue tecnológico en los procesos edificatorios ha incentivado el regreso de materiales tradicionales como la madera, el ladrillo o incluso elementos térreos. Hasta el momento, la ejecución de tareas repetibles que requieren una precisión única en el proceso constructivo es un logro destacable de los brazos robóticos, pero cabe cuestionarse de qué manera se transformarán las técnicas constructivas. Los arquitectos han iniciado una fase exploratoria sobre cómo se puede utilizar esta tecnología para algo más que el ensamblaje y la automatización.

Los brazos robóticos se han posicionado en investigaciones constructivas dentro de la academia, así se han desarrollado conjuntos geoméricamente complejos que requieren alta precisión de cálculo y ejecución. Inicialmente, han sido utilizados para crear prototipos efímeros a pequeña escala, pero a medida del avance de la tecnología, se lograrán estructuras de mayores dimensiones.

²⁴ David Humberto Abondano Franco. “De la arquitectura moderna a la arquitectura digital: La influencia de la revolución industrial y la revolución informacional en la producción y cultura arquitectónica”. (Tesis doctoral inédita, Universidad Ramón Llull, 2018), 23.

Materialidad Digital

El aumento de la difusión de las máquinas modernas y el creciente interés de los arquitectos por experimentar con ellas han esbozado la sinergia entre los procesos digitales y materiales en el diseño y la construcción, como un concepto de importancia cada vez mayor. Este nuevo paradigma se ha definido como materialidad digital, desde la interconectividad de los datos y el material, la programación y la construcción. De este modo, el material no sólo se considera en términos de propiedades físicas o estéticas para enriquecer nuestro diseño conceptual, sino que es explorado a fondo y moldeado por la información digital.²⁵

La traducción de datos digitales llevada a cabo por brazos robóticos facilita la deposición de material con mucha mayor organicidad. Como resultado, surgen geometrías escultóricas de una unicidad sorprendente, es por tal que a las técnicas robótico/computacionales se le compara con el trabajo de los artesanos de la arquitectura decimonónica.

La Revolución Industrial dividió el diseño de la construcción – proceso iniciado desde el Renacimiento – además de alentar la especialización del arquitecto como artífice encargado primordialmente de la forma y belleza del edificio y por otro lado, aquellos que se ocuparían de su construcción. Sin embargo, al

²⁵ Ingrid Paoletti, “Personalización avanzada para el diseño arquitectónico y la construcción: panorama y experimentaciones”. *The Digital Reveal. Arquitectura de era post – Digital*. (Colombia: Universidad Piloto de Colombia, 2016): 26, <https://re.public.polimi.it/retrieve/handle/11311/1021868/224823/MemoriasSeminario2016-CONFERENCIAS.pdf>

vincularse ambos procesos, también conlleva una modificación a la concepción aristotélica de las formas, así como las consideraciones respecto a los sólidos platónicos.

La mecanización de la arquitectura mediante CAD (Computer-Aided Design) sustituyó los planos hechos a mano, pese a ello no logró gran progreso respecto a la forma y características con las que se concebían los proyectos dado que se repetía el esquema de representación bidimensional. La verdadera transformación inicio cuando la modelación computacional tridimensional apareció en el escenario arquitectónico. Este germen de herramientas computacionales permitió a los arquitectos explorar nuevos procesos proyectuales y acuñarsobre todo novedades formales.

La materialidad digital (MD) se refiere a la fusión de los procesos de diseño y fabricación e implica la transferencia directa de datos desde un programa de modelado 3D a una máquina CNC o a un brazo robótico. Los archivos creados computacionalmente se envían aun enrutador para fabricar con alta precisión y velocidad los modelos.

MD es un concepto propuesto por el arquitecto y teórico estadounidense Stan Allen en su texto “Velocidades terminales: el ordenador en el estudio de diseño”, publicado en 1995. En esta disertación hace referencia a la fabricación digital y por tanto a la arquitectura *non standard*. Utiliza tal criterio para sugerir que el ordenador es una herramienta insuficiente para realizar proyectos de elevada complejidad geométrica, lo fundamental es una interconexión entre el ordenador y una serie de dispositivos para llegar a una realidad específica tangente y así poseer la capacidad para generar un prototipo rápido:

“cuando nos referimos al ordenador normalmente hablamos de un único aparato, sino de un ensamblaje de dispositivos de entrada y de salida de datos que da la capacidad de negociar entre el mundo abstracto de los instrumentos de diseño arquitectónicos y el propio carácter real de la arquitectura como parte del mundo físico.”²⁶

Allen conmina a una revisión de la práctica profesional, precisamente gracias al prototipado rápido, el cual va desde “la producción de maquetas tridimensionales directamente desde los archivos informáticos, así como el uso de troquelado y la fabricación en el proceso de construcción.”²⁷

Con la MD se integrarán las capacidades de diseño y edificación informatizada, donde las propiedades del material se unen al proceso de diseño, ello obliga a los arquitectos a repensar los arcaicos preceptos de estandarización y prefabricación. Propone también la introducción de datos como una serie de variables - matemáticas, materiales y procedimiento - a tomar en cuenta para poder unificar el proceso de diseño y fabricación. Esta negociación entre el mundo virtual y el físico es un proceso que, según Allen, extiende las capacidades instrumentales del ordenador al mundo de los objetos, con ello se da lugar a una materialidad digital.

Por su parte, la teoría de Antoine Picon se posiciona como una respuesta al texto *Estudios sobre cultura tectónica* - 1999 - de Kenneth Frampton, en el cual aborda una posible desmaterialización de la

²⁶ Stan Allen. *Velocidades terminales: el ordenador en el estudio de diseño*. En ORTEGA, L. (Ed.) *La digitalización toma el mando*. Barcelona: Gustavo Gili, 2009. p. 48.

²⁷ Antoine Picon. “*La arquitectura y lo virtual. Hacia una nueva materialidad*”. *ARQ: Arquitectura Diseño Urbanismo*, n°63, (2006), 49.

arquitectura. Picon afirma que se puede considerar como un *unicum* compuesto al hombre y la máquina, argumenta que siempre han existido las disidencias entre los planos arquitectónicos y la obra construida, más allá de si se trata del periodo donde la arquitectura digital es protagonista o no.

El estimulante discurso del diseño computacional ha elevado la capacidad de retroalimentación junto con su fabricación. Modos híbridos de representación, proyectación y edificación en los diferentes estados del proceso del proyecto forman parte de un sistema multidireccional de producción, gracias a la variedad y versatilidad de técnicas que las tecnologías ofrecen:

Branko Kolarevic emplea la expresión “continuum digital” para referirse a esta continuidad entre la esfera abstracta y la esfera física de la arquitectura facilitada por las tecnologías de diseño y fabricación. Rivka y Robert Oxman, por su parte, emplean “digital materiality” para referirse a los vínculos entre concepción y producción que se establecen a través de las tecnologías digitales.²⁸

Uno de los avances más importantes en la MD es la creación de objetos únicos en serie con cuantas variaciones sean imaginables, sin costos adicionales. Las opciones formales son ilimitadas ya que estos procesos postindustriales admiten cualquier diseño y pueden prefabricarse. Si bien, estos procesos proyectuales y edificatorios son atípicos, es factible el uso de materiales constructivos tan usuales como el concreto, la madera o el ladrillo. Hemos pasado la era del molde para adentrarnos en la era de la modulación personalizada.

El concepto de materialidad digital ha sido redesarrollado por los

²⁸ *Ibíd.*

arquitectos Fabio Gramazio y Matthias Kohler (Gramazio & Kohler, ETH Zürich). Con la publicación de su icónico libro *Digital Materiality in Architecture* de 2008. Han creado un vínculo entre diseño computacional y su fabricación, es decir los datos y el material de construcción como un proceso unificado. Sondean el potencial entre el diseño computacional, la fabricación y las técnicas constructivas en una nueva lógica material-edificatoria:

A medida que la materialización se vuelve más computacional y generativa, el diseño se vuelve cada vez más físico y procesal, lo que conduce a un posible punto de convergencia donde diseño y construcción se fusionan. Esta potencial fusión de los procesos de diseño y fabricación proporcionan un considerable desafío al pensamiento de diseño establecido y actual técnicas de diseño. Para el primero, la aventura intelectual de explorar el potencial de diseño latente de un cambio hacia la construcción computacional puede encontrar una mayor inspiración en modelos biológicos más que tecnológicos.²⁹

Gramazio & Kohler han creado una secuencia de obras arquitectónicas de un plasticismo muy singular, en las cuales la materialidad digital:

permite combinar las habilidades y deficiencias de los seres humanos y las máquinas para obtener una ventaja deliberada. En la era digital, esto significa que mientras la máquina con su lógica numérica puede gobernar una cantidad infinitamente grande de números, solo los

²⁹ Achim Menges. *"The New Cyber-Physical Making in Architecture: Computational Construction."* *Architectural Design* 85 (2015), 33, <https://eds-p-ebSCOhost-com.pbidi.unam.mx:2443/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=2&sid=f2f51cee-0029-4614-9a37-819a07069ce2%40redis>

seres humanos con sus habilidades cognitivas y enfoques intuitivos pueden reconocer el significado en ellos.³⁰

Los materiales utilizados en las TDCFR brindan perspectivas muy particulares:

“estableciendo novedosos vínculos que amplían y enriquecen la relación entre la ideación, la tecnología, el entorno construido y el medio ambiente”, por tanto, “la condición material se intensifica y el diseño es orientado a potenciar las particularidades de los materiales experimentando en todas sus escalas y propiedades.”³³

Algunos materiales como las fibras poliméricas de vidrio y carbono, la madera, así como fibras naturales han ocupado el lugar que hasta muy poco tenía el concreto armado. Dentro de la producción a escala arquitectónica, donde el peso propio del material es una gran preocupación para las estructuras de mayor envergadura, los compuestos de fibra livianos proporcionan un rendimiento sin igual.

Aunque la denominación de esta metodología conlleva el término digital, cabe señalar que su uso ha cambiado drásticamente desde que se acuñó por Allen, por tanto, su denominación actual migra hacia materialidad computacional, puesto que: “...la fabricación computacional implica el desarrollo de un proceso de exploración de materialización impulsada por la retroalimentación ciberfísica, que extiende el diseño en lugar de simplemente realizarlo”.³¹

³⁰ Jan Willmann, Fabio Gramazio y Matthias Kohler, *Towards an Extended Performative Materiality - Interactive Complexity and the Control of Space. Theories of the Digital in Architecture*. (London; New York: Routledge, 2014), 305.

³¹ Achim Menges. *The New Cyber-Physical Making in Architecture*.

Los ecos de Semper en los sistemas edificatorios del S. XXI

“Otto Wagner, en su texto *Moderne Architektur*, argumentaba que la Forma artística – *Kunstform* - surge del Arte de la Construcción - *Baukunst* - y que, por tanto, las nuevas técnicas constructivas implican nuevas formas.”³²

Una revolución ideológica de finales del S. XVIII transformó paulatinamente la concepción vitruviana del origen de la arquitectura con una serie de posturas opuestas; entre ellas se encuentra Gottfried Semper con su obra “*Der Stil*”, un tratado en el cual desarrolla una clasificación taxonómica del arte de la construcción a través de analogías textiles: “De ahí el uso del término *Wandbereiter*, *confeccionador de telas* pero también *montador de paredes*, y la identificación de esta *Técnica prearquitectónica* - *Vorarchitektonische Technik* como arte que origina la construcción.”³³

En su obra trazó metódicamente el progreso de los textiles hacia procedimientos de fabricación para materiales más duraderos como la cerámica, asociada a la **tectónica** o la carpintería, asociada a la **estereotomía**, puesto que, para Semper, los textiles son el fundamento de todas las artes técnicas y por tanto son el origen de todas las formas arquitectónicas básicas. Así bien, el protagonismo de la envolvente arquitectónica en “El principio de la vestimenta en la arquitectura” - *Das Prinzip der Bekleidung in der Baukunst* - y su

Computational Construction Material Synthesis: Fusing the Physical and the Computational, (2015), 31.

³² Óscar Rueda Jiménez. *Bekleidung. Los trajes de la arquitectura*. (Tesis doctoral inédita, Universidad Europea de Madrid, 2015), 6.

³³ *Ibíd.*

función como creadora de espacios a través de elementos textiles es un novedoso planteamiento constructivo en la teoría semperiana. En la misma línea argumental, establece una intensa relación entre las vestimentas humanas y arquitectónicas mediante un exhaustivo tratado en el cual rastrea los orígenes de la construcción – *Baukunst* – desde un punto antropológico-textil: “... *el inicio de la construcción coincide con el inicio de los textiles*”³⁴

Enuncia además, al nudo y a la costura como elementos primigenios, el primero como base de la tectónica mientras que el segundo término apuesta por la estereotomía. Con esta visión sobre el origen textil de la arquitectura explica la translación del entrelazado para crear cercas externas delimitadoras de espacios al posterior levantamiento de paredes internas. La primera envolvente espacial creada por el hombre fue en la constitución de sus viviendas, mediante fibras, éstas se entretrejan para crear cercas delimitadoras, pero también para generar muros divisorios y muros externos.

En el mito del origen textil de la arquitectura, conviene tener en cuenta que Semper pone de manifiesto situaciones determinantes en el horizonte decimonónico: las correlaciones constructivas entre los principios de la estructura, la envolvente y su progreso a través del tiempo, todo llevado a cabo mediante urdimbres:

El tapiz siguió siendo pared, la delimitación espacial visible. Los muros que se encontraban detrás de él, con frecuencia muy sólidos, eran necesarios para otros fines que no tenían que ver con la espacialidad sino con la seguridad la resistencia la mayor duración y otras cosas similares.³⁵

³⁴ *Ibíd*, 19

³⁵ Giovanni Fanelli y Roberto Gargiani. “El principio del revestimiento.

En su texto “Los cuatro elementos de la arquitectura”, asocia a la **envolvente** con los textiles, la **cubierta** con la carpintería (técnica tectónica), la **plataforma** originó a la mampostería (técnica estereotómica), mientras que el **hogar** originó el arte cerámico. Aunado a ello, logra identificar una serie de características inherentes a determinados elementos constructivos como la forma interna “*kernform*” como estructura portante y las envolventes con la forma artística.

La repercusión que sus postulados teóricos tuvieron en la arquitectura moderna se ha extendido hasta la segunda década del S. XXI en un contexto completamente diferente e incluso ajeno a él. Los ecos del pensamiento de Gottfried Semper con su interpretación textil de la arquitectura constituyen un núcleo fundador para la cultura constructiva actual. La importancia de sus razonamientos arquitectónicos cabe casi a manera de horma en las concepciones edificatorias robótico- computacionales. Parte de su legado consiste en un profundo análisis sobre cómo a través de la historia de la construcción el entrelazado de fibras ha sido una constante clave en la delimitación de espacios exteriores e interiores y el posterior desarrollo de cubiertas. En su teoría hace referencia a que las envolventes textiles se solidificaron en soportes de madera y posteriormente en elementos pétreos.

Bajo el cobijo de una centuria de importantes avances tecnocientíficos para la arquitectura, las técnicas desarrolladas computacionalmente han bebido inintencionadamente de las concepciones constructivas presentes en las argumentaciones

Semper y el origen textil de la arquitectura”, *Arquitectura Viva* n.º174 (2015):13.

semperianas. El inminente paralelismo entre las innovaciones tecnológicas textiles y la arquitectura actual, incentiva cuestionamientos de origen antropológico, pero sobre todo, para efectos de esta investigación, produce una profunda inflexión en los cánones constructivos contemporáneos.

En tal sentido, es importante avocarnos a la concepción de las envolventes desde la técnica textil, pero no como una percepción simbólica analógica o metafórica como lo fue durante los siglos XIX y XX. Esta nueva interacción ofrece un panorama, - a diferencia de los pasados – constructivo de materiales flexibles y membranas textiles que trabajan a tracción; con ello surge un vasto campo de experimentación donde los elementos de urdimbres dúctiles permean el diseño y fabricación del parque edilicio.

Las configuraciones de las envolventes presentan patrones de tejidos CNC, así mismo, su correlación híbrida representa un testimonio de las potencialidades de los nuevos procedimientos constructivos de diseño algorítmico y fabricación mediante herramientas robóticas.

El universo textil ha propiciado la eclosión de una cultura arquitectónica reinterpretativa de las teorías de Semper, en donde la transcripción de los arcaicos patrones tejidos, anudados o cosidos para la creación textil, migraron hacia elementos cubiertas biomiméticas de los más diversificados materiales, tales como la madera, las fibras poliméricas y orgánicas o el hormigón.

Aunque el sentido textil de las envolventes actuales no intenta restaurar la visión constitutiva del mito semperiano de los orígenes de los textiles arquitectónicos, conlleva una fuerte connotación simbólica, un estilo textil en el cual, la correlación indumentaria

humana y edilicia constituye un hilo conductor en la unificación estilística vestimenta/edificio, una conexión extraordinaria entre el arte del vestir y el arte de construir; puesto que representa las correlaciones paralelas. Así, *das prinzip der Bekleidung* resulta la herramienta esencial para identificar la envolvente arquitectónica con la vestimenta.

La reciente producción arquitectónica textil, obliga a profundizar en posiciones teóricas al respecto, por ello, el papel que juega Semper en la convergencia entre textiles y discursos arquitectónicos gobierna esta relación a la vez que inaugura un campo experimental para entender las envolventes edilicias como un dispositivo estetizado de la fértil cultura material textil. Dicha producción está conformada por diferentes técnicas constructivas que engloban al textil como cocreador de la morfología arquitectónica, en la que según la teoría de Semper se derivan las otras técnicas constructivas, la tectónica y la estereotomía:

-El Nudo, elemento técnico primigenio era la base de la tectónica pues permitía unir elementos lineales de ahí la utilización de este término textil para denominar las articulaciones de la carpintería. Su materialización más elevada fueron las articulaciones clásicas el Capitel y la Basa de la arquitectura alquítrabada.

- La costura de igual modo era la técnica primigenia que permite unir superficies en una sola entidad y era la base de la estereotomía de ahí procedían los aparejos de sillería de piedra fábricas de ladrillo.

De esta manera, en los proyectos que aquí se presentarán, es posible que la configuración de urdimbres – como elemento maternal semperiano - lleve implícita una variedad de usos tales como

membranas textiles con función de encofrar, andamios poliméricos para enlazar estructuras funiculares, listones demadera que trabajan a flexión como semejanza textil, piezas arquitectónicas que adoptan los principios de tejer, coser y/o anudar logradas mediante una gama heterogénea de materiales y técnicas:

Los edificios se articulan, pero también se tejen, se levantan con estructura y se cierran con revestimiento; combinan o contrastan su condición tectónica y textil. El gran debate del S. XIX entre la lógica constructiva y la envolvente ornamental llega a nuestros días intacto en su capacidad de sugestión, y valioso aún para entender lo que se proyecta: muchas obras contemporáneas inteligibles desde el racionalismo clasicista del orden estructural adquieren sentido contempladas como artificios basados en el revestimiento.³⁶

En dichas técnicas se hace presente el principio de la sinceridad constructiva enunciado por Semper en 1851 (cada elemento debe aparecer claramente diferenciado y no mostrarse bajo otra apariencia) y aun cuando su fundamentación intelectual gozó de un mínimo favor por parte de los intelectuales de filiación germana, su influencia en la configuración del episodio que estamos transitando podría desembocar en una singular excusa para trastocar los discursos de la modernidad canónica. Sus repercusiones están reformulando la historia constructiva de nuestra disciplina gracias a argumentos contrastantes pero complementarios entre materiales y sistemas constructivos.

La revolucionaria teoría de Semper se establece de manera relevante

³⁶ Giovanni Fanelli y Roberto Gargiani. “*El principio del revestimiento. Semper y el origen textil de la arquitectura*”, *Arquitectura Viva* n.º174 (2015):13.

en la actualidad, dado que es posible fundamentar con ella, las técnicas constructivas robotizadas, las cuales, paulatinamente han transformado a la arquitectura contemporánea a través de obras efímeras, que han logrado quebrantar, más allá de las filiaciones estilísticas racionalistas y sus normas estéticas, la nueva manera de fabricar arquitectura. De tal manera, el origen de los proyectos que aquí se presentarán, parten del progreso y consolidación de los textiles, arraigados ya en la fabricación robotizada, pues éstos, según Semper, representan el verdadero origen de la arquitectura.

El tejido de urdimbres 3D, nos ha llevado hacia una nueva arquitectura, alejada ya de las prácticas constructivas anacrónicas, en la que figura Semper como soporte teórico. Los proyectos son concebidos como envolventes, desde la técnica textil. Por un lado, la madera como material que se entreteje o se flexiona como textil para generar obras con poliedros irregulares a flexión activa. Así mismo, las fibras poliméricas que se entretejen también para sustentar proyectos cúpulas y membranas semiesféricas. Finalmente, el hormigón que auspicia a los textiles como encofrados para optar por membranas y losas de entepiso.

Conclusión

La mecanización de las técnicas edificatorias ha transitado hacia procesos robotizados, lo cual posiciona a los arquitectos ante un espectro de posibilidades infinitas para generar innovaciones en la concepción del diseño, la organización espacial, el comportamiento material, estructural, pero sobre todo en la manera de construir.

Ello ha enriquecido la gama de proyectos en términos morfológico-espaciales, se han logrado elementos prefabricados con costos similares a la estandarización industrial, así como una inflexión importante en la plasticidad de las obras, e incluso se han implementado procesos para avanzar en el cumplimiento de los compromisos ambientales que la arquitectura tiene con nuestro hábitat. Las preocupaciones que se cruzan entre lo físico, virtual y técnico constructivo son una serie de desarrollos discursivos que han replanteado el uso de las herramientas computacionales y brazos robóticos, para visualizarlos como meras extensiones de las habilidades humanas, lo cual incidirá en una renovación imperativa de los cánones proyectuales-edificatorios.

Las tecno utopías son una tendencia en los proyectos arquitectónicos actuales, las expresiones hiper orgánicas derivadas de la implementación de la tecnología computacional en la arquitectura dan como resultado un parque edilicio con denotada prioridad formal, pese a ello, en la mayoría de los casos carecen de discursos teórico-metodológicos que fundamenten sus propuestas arquitectónicas.

Este capítulo planteó las bases tecnológicas y teóricas que los sistemas constructivos utilizan en los proyectos a analizar. La toma

de conciencia sobre algunas técnicas de fabricación del pasado casi inmediato, su reinterpretación o mejora en muchos casos, así como la invención de otras, pone de manifiesto la preocupación que existe dentro de la academia por conseguir prácticas edilicias que subsanen los grandes problemas a los que se enfrenta nuestra disciplina tanto en términos ambientales, socio culturales y edificatorios. La sociedad y el medio ambiente serán beneficiados en tanto que estos desarrollos edilicios sean puestos en práctica dentro de la industria y satisfagan tales o cuales requerimientos.

La robotización de los procedimientos constructivos actuales, su interconexión con los progresos computacionales y la tecnología de fabricación han permitido a los arquitectos idear diseños fantasiosos con relativa facilidad, pero sobre todo y a diferencia de los proyectos de inicios del S. XXI, les ha facultado su materialización.

Sus múltiples variaciones metodológicas y de componentes o insumos, otorgan la materialidad a las obras arquitectónicas. Por tanto, los pabellones son el medio por el cual se instrumentaliza la arquitectura de procesos robótico/computacionales. Representan el vehículo, no la finalidad. Esta tendencia de programación constructiva se funde en una integración tecnocientífica/plástica como punta de lanza en un movimiento en el que prevalece un fuerte carácter geométrico sinusoidal como respuesta al tratamiento novedoso para materiales tradicionales, así como a procesos de optimización topológica.

Cap. 2 Encofrados flexibles 3D para membranas de hormigón

El hormigón, como otros muchos materiales contemporáneos, combina la dilatada historia de su empleo en la edificación con una prolija trayectoria reciente de sofisticación productiva y tecnológica, de manera que resulta ser a la vez muy antiguo y muy moderno...³⁷

Las membranas de concreto han estado presentes desde el Imperio Romano. El punto cumbre del sistema constructivo le pertenece al Panteón de Agripa. Mientras que la utilización del concreto con barras de acero como refuerzo lleva poco más de un siglo. La seducción por esta nueva técnica llevó a arquitectos del linaje de Frank Lloyd Wright, Le Corbusier, Walter Gropius y más recientemente a Candela, Nervi, Zaha y Calatrava a utilizarlo en sus proyectos, los cuales huían del academicismo más riguroso. Algunas de estas obras son ya icónicas en el parque edilicio brutalista.

Según Le Corbusier “brutal” se debe al *béton brut*, hormigón “en bruto”, de acuerdo a Jean Dubuffet se constituye como *Art Brut* y conforme a Reyner Banham se llama brutalismo. Estas denominaciones se enfocaron en visibilizar y nombrar una nueva sensibilidad que enaltecía la honestidad de los materiales.

Desafortunadamente, hemos atestiguado que lo masivo y la pesadez de estos proyectos se auto exterminan por los defectos constructivos. Aun cuando se ha perfeccionado el cemento desde épocas romanas, la impronta del clásico Panteón de Agripa ha permanecido erguido por dos milenios y pese a que durante el S. XIX se mejoró la técnica

³⁷ Luis Fernández-Galiano, “Hormigón sostenible”, *Arquitectura Viva* n.º 128 (2009), 3: <https://arquitecturaviva.com/articulos/hormigon-sostenible>

con varillas de acero como refuerzos (que trabajan a tensión) embebidas en el concreto, los ingenieros y arquitectos que auguraron larga vida a estas obras han fallado. El triunfo tácito de la arquitectura hormigonada (No toda arquitectura de concreto armado es brutalista) agoniza cada vez más debido a su poca durabilidad. Estas obras tardomodernas han producido un desmoronamiento que lleva a la obsolescencia arquitectónica con una inmediatez sin precedentes.

Este capítulo constituye una mirada sobre los progresos actuales respecto a encofrado flexibles 3D para membranas de hormigón.

La producción experimental del neo brutalismo fraguada desde la academia, reivindica a las estructuras hormigonadas por medio de un importante conjunto de cualidades creativas que logran explotar los atributos plásticos, materiales, estructurales y las encapsula en proyectos exhibicionistas, aparentemente masivos pero paradójicamente poseen cualidades de ligereza extraordinaria.

La investigación pretende demostrar que el vínculo entre los textiles y el concreto encuentra un equilibrio tanto formal como mecánico y topológico/estructural, además plantea una serie de cuestionamientos respecto a ¿Cuáles son las capacidades arquitectónicas del encofrado flexible para estructuras de hormigón respecto a la técnica constructiva y la expresión plástica?, ¿De qué manera los encofrados flexibles pueden controlar la morfología del concreto?, ¿Cuántas técnicas pueden desprenderse de esta metodología? ¿Se podrá excluir totalmente el uso de los encofrados convencionales en la industria?

El concreto es por antonomasia un elemento mimético que puede albergar formas inimaginables, ello en gran medida gracias a su enorme maleabilidad proveniente de sus inicios líquidos; va desde las formas más elementales a las más complejas, colado *in situ* o

prefabricado. Preserva además una antigua tradición en la arquitectura debido a su resistencia a la compresión y su plasticidad. Como heredero innegable de los materiales pétreos ha sido utilizado a manera de estructura, repellado, como piel o cubierta.

Recientemente se suscitó en los arquitectos un renovado interés en el concreto impreso, un método de fabricación aditiva en la cual se deponen capas consecutivas de material verticalmente, de tal manera que se logran constituir elementos extruidos a partir de modelos tridimensionales. Ello representa una alternativa ventajosa sobre los sistemas constructivos tradicionalmente utilizados; aun cuando su popularidad recaiga en elementos de geometrías complejas más que en el mejoramiento de su rendimiento estructural. A pesar de ello, un aspecto crítico aun en desarrollo para lograr escalas arquitectónicas con esta técnica, es el control preciso de la reología del material, puesto que requiere mandatoriamente alcanzar la resistencia adecuada para soportar las capas venideras.

Con este método se han fabricado columnas o muros mediante prometedoras técnicas como Mesh Mould para un muro de concreto curvo con armado mediante asistencia de un brazo robótico industrial, el cual combina encofrado y refuerzo estructural en un solo sistema de fabricación. La técnica Knicrete explora los encofrados textiles o Smart Dynamic Casting, la cual utiliza un encofrado móvil para la fabricación de columnas.

Sin embargo, un tema clave en la arquitectura son las cubiertas, dado que resultan el elemento constructivo que más concreto utiliza, pese a ello, aun en la década pasada, sus morfologías logradas mediante hormigón impreso en 3D se limitaban mayoritariamente a elementos ortogonales apegados totalmente a la arquitectura racionalista. En

dicho sentido valga recordar que el uso industrial del concreto armado propició la aparición de un género inédito recién despertado el S. XX, las estructuras laminares. Las obras se componen por películas de material suficientemente grueso para soportar su propio peso sin deformarse. Estaban encausadas en formas geométricas puras definidas por fórmulas analíticas elementales, como son los paraboloides. Su proliferación como edificio-cubierta se llevó a cabo a través de la obra de Euggne Freyssinet, Robert Maillart, Franz Dischinger, Isler, Müther, Torroja, Nervi entre otros más. Estos constructores se afianzaron con la tecnología más avanzada de su época para alcanzar la materialidad de sus teorías. Ello favoreció un vuelco de los cánones hasta entonces establecidos en la ingeniería y arquitectura para lograr proyectos alabeados de superficies regladas que ofrecían singulares geometrías y austeras en el uso de material.

En el S.XX se encuentra como precursor el ingeniero hispano mexicano Félix Candela, quien en 1951 utilizó telas de saco o costales sobre perfiles de madera como contenedores del concreto para la construcción de bóvedas antifuniculares de cáscara, la primera de ellas con la técnica Ctesifonte, fue construida en San Bartolo, en la zona conurbada de la Ciudad de México. Los *hypars* con todas sus variaciones son la seña identitaria que dotan el concepto de membranas candelianas. El manejo audaz de sus posibles combinaciones, lejos de significarle un encasillamiento, lo consagró como uno de los más prolíficos constructores del S. XX. Sus ingravidas bóvedas regladas de hormigón que cubren amplios claros a partir de la experimentación del paraboloide hiperbólico propiciaron que fuera reconocido por arquitectos, críticos, historiadores e ingenieros como un visionario que aquilató un enorme prestigio como especialista en el uso de sistemas constructivos, particularmente para membranas de concreto armado.

Adicionalmente, la obra de Heinz Isler sobresale en estos procedimientos por su especial sensibilidad constructiva arraigada en el mundo natural. Isler, a diferencia de Candela, se alejó de los *hypars* para fecundar un mundo libre de la geometría de formas puras. En sus sistemas de exploración morfológica, tipificó metodologías edificatorias mediante expansión (*earth mounds*), por suspensión (*hanging cloths*) y por inflado (*inflated rubber membranes*). Sus estructuras laminares de concreto armado poco ortodoxas, adoptaron formas orgánicas y que fácilmente se podrían insertar en las convenciones formalistas actuales. Ello pone de manifiesto que sus membranas se posicionan como punto de partida para el desarrollo de metodologías constructivas contemporáneas.

Las estructuras laminares fueron desarrolladas por una serie de factores que permitieron aterrizar la técnica constructiva, tales como el buen recibimiento de la industria del concreto armado gracias a su extraordinario desempeño estructural, a su potencial plástico y libertades geométricas, así como a su precio accesible e inmediata disponibilidad. Pese al éxito y la variedad de proyectos que se lograron consolidar, su declive se debió en gran medida por los altos costos de sus encofrados y su poca o nula efectividad para ser reutilizados.

En años más recientes, constructores como Fisac, Kenzo Unno o Mark West han fabricado muros, columnas y hasta losas prefabricadas, reemplazaron los encofrados rígidos tradicionales por mallas textiles flexibles.

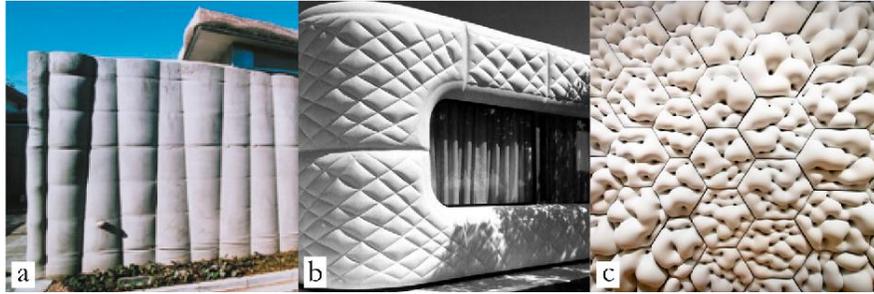


Fig. 2 a. Muro de Kenzo Unno. b. Fachada de Miguel Fisac. c. Muro de Matsys Design. TAILORED FLEXIBILITY Reinforcing concrete fabric formwork with 3D printed plastics, pág. 3.

Actualmente, el resurgimiento y proliferación de membranas de múltiples materiales, pero particularmente las de concreto armado, forman parte de la eclosión de sistemas de fabricación robótico computacional. Estas expresividades constructivas anticlásticas (la curvatura gira en direcciones opuestas) que se han multiplicado efervescentemente subrayan el ahínco de los constructores por adentrarse en los sistemas sometidos a las fuerzas de gravedad mediante parábolas, hipérbolas, elipses y recientemente por estructuras híbridas que se alejan de los planos ortogonales.

Los arquitectos e ingenieros han posicionado en la cúspide de las técnicas constructivas al concreto armado como material para estructuras de carga gracias a sus propiedades mecánicas, aislantes, ignífugas y a su versatilidad dado su característica fluidez. Pese a ello, está asociado indisolublemente con moldes rígidos y ortogonales que conducen a formas generalmente prismáticas. Resulta un material poco propicio para lograr geometrías que escapen de los ángulos rectos, el huir de esta ortogonalidad conlleva la necesidad de complejos moldes para encofrar, ello ha condicionado a la técnica constructiva.

El encofrado es un molde o armazón generalmente prismático, temporal o no para retener el concreto fluido hasta fraguar. A éstos se destinan recursos económicos importantes, a tal grado que pueden igualar la partida que se lleva el cemento y sus agregados. Para el moldeo de geometrías sinusoidales son desechables, ello incrementa los costos tanto en los materiales como por la mano de obra, a la vez que los tiempos de entrega aumentan significativamente:

...el hormigón es el material perfecto para hacer todo tipo de formas ya que, después de todo, el hormigón fresco se puede verter en cualquier forma de encofrado. Sin embargo, los encofrados tradicionales son muy rígidos y de líneas rectas, y encofran paredes planas y vigas o columnas rectangulares. Estos encofrados de paneles son a menudo el factor limitante para una arquitectura más orgánica...El encofrado de tela flexible podría crear nuevas posibilidades para que los diseñadores y contratistas realicen este tipo de formas orgánicas.³⁸

Los encofrados convencionales de madera, acero u otros materiales son primordiales para llevar a cabo el proceso de fraguado del concreto para otorgarle finalmente su expresividad, pero también lo condiciona en sus formalidades. Estas limitantes constituyen un motor para la innovación en el desarrollo de elementos constructivos que potencien plenamente la expresividad plástica, que mantengan las características físicas y mecánicas del concreto, pero sobre todo que incrementen su rendimiento formal/funcional.

Aunado a ello, el concreto como segundo material más utilizado en la industria solo después del tabique es uno de los mayores emisores

³⁸ N. Cauberg, B. Parmentier, Fabric formwork for flexible, architectural concrete, 1.

de CO2 en el planeta; por tanto, mediante el uso de metodologías paralelas para menguar y/o mitigar tales efectos negativos se han generado múltiples versiones de encofrados flexibles 3D. De esta manera se incursiona en un profundo cambio sobre las doctrinas racionalistas, ya que esta metodología representa una de las perspectivas más vanguardistas en la reforma morfológica arquitectónica.

La preocupación por una huella de carbono lo más cercana a cero en la industria de la construcción, ha hecho que desde la etapa del diseño, se prevea la reducción de los materiales, aún más cuando se trata del concreto, un material sumamente difícil de reciclar. Si bien el ahorro de material es un hecho, con la impresión 3D se logran morfologías complicadas para fabricar de manera convencional.

Para el moldeo de elementos arquitectónicos curvos, los encofrados se vuelven más costosos, por tal es que se está experimentando con encofrados flexibles 3D. Estas estructuras para encofrar nos referencian nuevamente al origen de la arquitectura desde la concepción textil vinculado con lo doméstico. La traducción de técnicas de la industria de la confección para el desarrollo de elementos arquitectónicos con concreto armado mediante encofrados flexibles, así como el uso de redes internas de acero “*splines*” para el mejor control de las fuerzas de tensión se han desarrollado bajo el criterio de generar sistemas edificatorios que simplifiquen la lógica constructiva en el diseño contemporáneo.

El encofrado textil es una técnica que implica el uso de redes tejidas para moldear el concreto; ha sido desarrollado para aprovechar las propiedades inherentes al material respecto a la generación infinita de morfologías. El encofrado mediante mallas de tela es:

...una tecnología de construcción que implica el uso de membranas estructurales como principal material de revestimiento para moldes de hormigón. A diferencia del encofrado tradicional, el material es muy flexible y puede desviarse bajo la presión del hormigón fresco.³⁹

El híbrido entre el hormigón y el *knitting* - un sistema de encofrado de tejido de punto tridimensional, hiperligero y desechable para superficies de formas libres - con la sofisticación de operaciones computacionales y un proceso de fabricación robótico ofrece soluciones optimizadas y por tanto más sostenibles. Posibilita una plasticidad extraordinaria que desafía los enfoques convencionales para formar elementos constitutivos en la industria de la arquitectura.

Los sistemas tradicionales para encofrar serán reemplazados progresivamente por alternativas como los encofrados textiles, dado que mejoran el desempeño del elemento constructivo a cimbrar y también resultan ser procedimientos más veloces y menos costosos. Esta metodología es una de las claves innovadoras para el moldeo de estructuras de hormigón, pues se mantienen embebidos en la estructura resultante, por tanto no es posible su reutilización.

A diferencia de la construcción convencional, los proyectos con hormigón fraguado a través de textiles 3D conminan a la producción geométrica compleja, principio que se enraíza en la optimización topológica, por tanto, estos proyectos resultan la mejor apuesta para sondear una metodología constructiva inédita.

³⁹ Veenendaal Diederik, Mark West y Philippe Block. “History and overview of fabric formwork: using fabrics for concrete casting”. *Structural Concrete* 12, No. 3 (2011), 1. DOI: 10.1002/suco.201100014

Como marco teórico se ha intensificado la búsqueda a través de la enseñanza que trajeron los procedimientos constructivos de abovedamientos tardogóticos mediante sus estrechas nervaduras, pero también en la obra de los constructores de membranas – *shell builders* - de hormigón del S. XX. La liviandad de estas bóvedas y de aquellas membranas escultóricas ofrece un despliegue geométrico que invita a la diseminación de sus postulados constructivos hasta la actualidad. Así, las investigaciones han desencadenado una red de propuestas que serán cruciales para que nuevas metodologías constructivas concordantes con las herramientas actuales progresen en nuestra disciplina.

Aun cuando pareciera que un empeño por adentrarse en las facultades escultóricas del concreto armado, intrínsecamente inclinado hacia geometrías curvilíneas ha desatado un apetito voraz dado la llegada de la fabricación computacional aditiva a la industria de la construcción, estas novedosas membranas textiles de hormigón, cumplen con una serie de fundamentos tecnológicos pragmáticos y no utópicos como lo sucedido en la arquitectura digital en los últimos años del S. XX.

Se han creado soluciones automatizadas que mezclan aspectos del diseño topológico con las propiedades mecánicas de los materiales, el modelado y la simulación computacional, la velocidad de la impresión 3D y su precisión geométrica con características morfológicas únicas en proyectos arquitectónicos a escala 1:1. Los elementos resultantes fraguados bajo el amparo de urdimbres tejidas 3D tienen un impacto positivo en términos de sustentabilidad. Aunque aparentemente son obras colmadas de ornamentos, en realidad **son exoesqueletos de concreto**. Su principal objetivo es llegar al mínimo uso factible del material a la vez que sus cualidades

estructurales se mantengan, con ello se generan componentes constructivos de geometrías altamente complejas y detalladas las cuales prescinden de los tradicionales encofrados.

El hilo conductor en esta metodología aparentemente dispar radica en los actos de auto conformación del hormigón, guiado por la técnica textil de encofrado:

En lugar de resistir las fuerzas hidrostáticas en compresión, que es la función del encofrado rígido tradicional, el encofrado de tela puede responder a las presiones y fuerzas para trabajar en forma activa, resistiéndolas en tensión...El encofrado de tela pone la etapa líquida del proceso al frente de la historia del proceso de definición de la forma del concreto. Permite comprender hacia dónde quería moverse y escapar el hormigón, solo para verse limitado por la resistencia a la tracción de la tela.⁴⁰

Las membranas arquitectónicas consiguen su ligereza gracias al espesor de sus materiales, por tanto, es fundamental el uso de encofrados como una piel limítrofe que enmarca una determinada forma. Las membranas textiles actúan activamente como soporte estructural del concreto.

A través de la historia de la arquitectura se ha descubierto que las mallas tejidas que funcionan flexiblemente resultan benéficas para el desarrollo de nuevos procedimientos para cimbrar. Estos sistemas han sido utilizados comúnmente en membranas de tracción desde épocas romanas. En la aparentemente breve historia del empleo de

⁴⁰ Remo Pedreschi y Lindy Richardson. Tailoring fabric formwork. *Proceedings of the International Society Of Flexible Formwork (ISOFF) Symposium 2015, Amsterdam, 2.* 83

membranas textiles a manera de cimbra, Vitruvio hacía referencia al desarrollo de un método constructivo para generar muros de contención rellenos de arcilla cimbrados con cestas de caña, según el texto “History and overview of fabric formwork: using fabrics for concrete casting”.⁴¹ Hace también una remisión para las cimbras de las bóvedas, particularmente para las de la Villa Medici en Roma, en las que recomienda el uso de cañas atadas.

De manera muy posterior el constructor germano Gustav Lilienthal desarrolló una losa de entrepiso formado por una tela que cubría el claro entre viga y viga para posteriormente colocar una malla o red de acero en la cual se vertía el concreto. Por otra parte, James Hardress de Warrenne Waller, apuntaló sus investigaciones en obras vernáculas para el desarrollo de la técnica nofrango, un sistema de encofrado logrado mediante textiles de fibras vegetales tensadas sobre marcos de madera. Acto seguido, patentó la técnica Ctesiphon – en alusión al monumento persa en Al-Mada'in – una aplicación de encofrados textiles especialmente creada para membranas ligeras de concreto armado.

El transitar de los rústicos tejidos hacia sofisticadas mantas 3d bajo un patronaje explícito para una obra determinada, conjunta las potestades de la tecnología arquitectónica con la sastrería computacional. Los textiles como parte de un sistema constructivo robotizado resultan una práctica novedosa en la que se generan ciclos de diseño y fabricación inéditos altamente artesanales.

⁴¹ Veenendaal, Diederik, Mark West y Philippe Block. “*History and overview of fabric formwork: using fabrics for concrete casting*”. DOI: 10.1002/suco.201100014 84

Esta metodología heredera de la experimentación vitruviana corresponde a un planteamiento que debido al auge del diseño y fabricación robótico computacional irrumpe en la arquitectura con novedosas posibilidades constructivas y plásticas. A medida que se han realizado experimentos con este método que aporta geometrías fluidas con operaciones constructivas de relativa simplicidad, se sintetizan en un bajo costo del encofrado y la obtención de formas complejas.

Las membranas textiles como encofrado pueden denominarse, según determinadas propiedades de sus entrelazados como *weaving*, *knitting*, etc. Son mantas 3D, las cuales requieren una serie iterativa de variables con propiedades y cualidades distintivas para tolerar el proceso de vaciado y posteriormente, soportar con mínimas deformaciones, el fraguado del concreto. La generación automatizada de patrones de tejido de punto 3D favorece la correcta modelación del concreto al formar un sistema autoportante. Así bien, el desarrollo de estrategias de codificación de modelos textiles 3D en software de modelado están unidas intrínsecamente en esta metodología que bebe de la tradición textil, pero que se actualiza mediante códigos paramétricos. El sistema denominado *tailored flexibility* es uno de los pilares en el éxito en la producción de geometrías mediante una sola pieza textil.

Las cimbras textiles para hormigón, a diferencia de las industrias del vestir o la automotriz, tienen una demanda mayoritariamente de módulos no repetitivos y no estándar, lo cual dificulta su producción en masa. Por ende, sus procesos de patronaje se desarrollan como trajes confeccionados a medida en aras de codificar las necesidades adecuadas en términos de densidad, de alineación de las urdimbres, así como de tensión a la que serán sometidas.

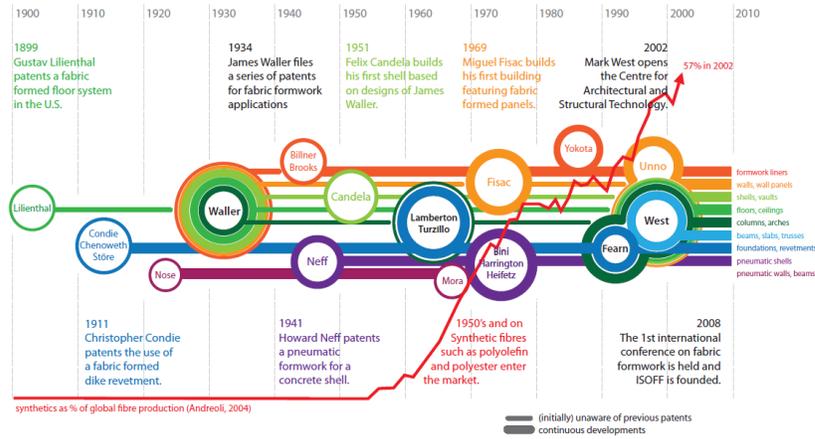


Fig. 4. Timeline of fabric formwork. The figure shows relations between by inventors, as well as a graph of the relative increase in synthetic fiber production. (Veenendaal, West and Block)

Stereogeneous consequence

Fig. 3. Fabric formwork for concrete. Investigations into formwork tectonics and stereogeneity in architectural constructions, 81.

Los encofrados textiles conforman como agente activo, el desarrollo de métodos para sistemas estructurales híbridos, ello insta a que la gestación de membranas de hormigón textil a través de la fusión de técnicas complementarias, otorguen finalmente un comportamiento estructural eficaz y el prototipo pueda dirigirse hacia otras escalas. Para tales efectos, las correlaciones entre el revenimiento del concreto, la densidad y patronaje textil, así como la flexión activa de las redes funiculares deberán estar en concordancia. En conjunto, se logrará codificar un sistema edificatorio apto para su incursión en la industria.

Así, los monolíticos prismáticos se diversifican mediante innovaciones técnicas, a este respecto, los sistemas textiles para encofrar, resultan ser apenas los cimientos en la configuración de los sistemas constructivos robótico computacionales para las membranas de concreto armado contemporáneas. De esta manera, el dominio del hormigón en la industria de la construcción se mantendrá vigente gracias a los esfuerzos por el enriquecimiento de su vocabulario respecto a los encofrados.

Ahora bien, una vez planteadas las estrategias de las que se nutren las obras que a continuación se remiten, cabría entender ¿Cuáles son las diferencias entre las técnicas que utilizaron los constructores vigesimonónicos con los sistemas de fabricación robótico computacional?, ¿De qué manera los preceptos de éstos se han transformado con el S. XXI?

En dos décadas, pasamos de la gráfica virtual al diseño computacional gracias a la modelación 3D, ello permitió un nuevo lenguaje de diseño repleto de superficies curvas que se integró velozmente en un principio organizador con los conceptos estructurales para dar pauta, gracias a la robotización en la fabricación, a elementos constructivos de geometrías complejas y optimizadas material, técnica, estructural y económicamente.

Para tal efecto, resulta inminente el acercamiento con el parametricismo y su estilo subsidiario, el Tectonismo. En 2008, con motivo de la onceava celebración de la bienal de Venecia, Patrik Schumacher publicó su manifiesto *Parametricism as Style*, ahí definió al parametricismo como el gran estilo nuevo después del modernismo. “El posmodernismo y el deconstructivismo han sido episodios de transición que marcaron el comienzo de esta nueva y larga ola de investigación e innovación.”⁴² Poco tiempo después hizo lo propio con el tectonismo, el cual considera como “una evolución orgánica del propio estilo”.⁴³ Como estado transicional del parametricismo, cabe enfatizar que: “...el objetivo explícito radica en el uso racional de las nuevas tecnologías que buscan incrementar la productividad (es decir, que los diseñadores están claramente

⁴² Bhooshan, Shajay. *Diseño como segunda naturaleza*,

⁴³ *Ibíd.*

comprometidos con la funcionalidad técnica).”⁴⁴ El tectonismo resulta en un nuevo entender del diseño y fabricación, así como en un incremento estilístico.

Durante este breve pero heterogéneo periodo, prolífico para la madurez de las TDCFR, como nuevo motor de una inconmensurable innovación plástica ha permeado en la arquitectura mediante su expresionismo estructural. Sus morfologías son generadas a través de exploraciones algorítmicas con nuevas inventivas de fabricación, ya que estas técnicas robotizadas cada vez más los repertorios formales que prevalecen en el diseño arquitectónico. Las TDCFR se expanden velozmente gracias a diversas obras clave, la mayoría de ellas efímeras y aunque han sido objeto de numerosos artículos, mínimamente recogen una visión crítica desde las técnicas edificatorias. Por consiguiente y en suma a las metodologías que legó el S. XX, una serie de TDCFR verá la luz a través de herramientas que permiten proponer membranas de hormigón en aras del reemplazo de moldes rígidos por sistemas flexibles.

⁴⁴ *Ibíd.*

Encofrado textil 3D antifunicular para membrana de hormigón anticlástica

Desde muy remotas épocas el hilo estuvo asociado a la construcción. En efecto, el hombre se valió de ese simple instrumento para determinar la geometría del muro no sólo en planta sino también (en elevación en este último caso unido a un peso para formar la plomada). No es extraño pues, que en una etapa posterior e introduciendo un cierto grado de refinamiento, aparezca el hilo usado para una nueva finalidad: diseñar la forma de estructuras tales como el arco y la bóveda. Nace así el modelo funicular.⁴⁵

Las reformas en el uso del concreto en esta última década han sido de tales magnitudes que las doctrinas del racionalismo quedaron progresivamente rezagadas debido a la llegada de TDCFR. El concreto es el material más utilizado en la construcción, también es causante de un elevado índice de emisiones de gases de efecto invernadero en todo el mundo. Ello ha alentado a que investigadores centren sus esfuerzos en métodos de impresión 3D, tanto del material depuesto como de sus encofrados, para con ello menguar en cierta medida los efectos negativos que conlleva construir con hormigón.

Según el método de fabricación, el hormigón se puede clasificar en colado, rociado, extruido, impreso en 3D por deslizamiento, mediante extrusión o inyección de aglomerante.

⁴⁵ Óscar A. Andrés y Néstor F. Ortega, “Extensión de la técnica funicular de Gaudi a la concepción y génesis de superficies estructurales”, *Informes de la Construcción* 44, No. 424 (1993):12, <https://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/1194/1279>

Uno de sus potenciales usos está en la fabricación de losas de entrepiso y membranas, para abordar este desafío, la fabricación robotizada se centró primeramente en encofrados textiles, dado que un gran número de proyectos contemporáneos demandan encofrados flexibles para lograr contener las geometrías sinusoidales no repetitivas que sus diseños requieren. De esta manera, los textiles aventajan a otros sistemas dado que ofrecen el cimbrado en una sola etapa, sin necesidad de modulación de moldes rígidos, ni cortes o costuras. Los datos específicos que orquestan el devanado y la sintaxis textil son fundamentales para la obtención de encofrados heterogéneos, los cuales no únicamente posibilitarán la captura del concreto, sino que será inminente su capacidad para tolerar el proceso de fraguado.

El textil 3D como un encofrado autoportante, permanente y sin residuos, encausa la abertura de canaletas como recipientarias de listones o redes de acero como refuerzo. Las mallas de tensores están creadas para deformarse bajo el peso del concreto húmedo según el diseño. Los encofrados para geometrías complejas han creado un campo de oportunidades para el diseño computacional y la fabricación asistida por brazos robóticos. En este sentido, las mallas tejidas 3D se encaminan como sistemas de encofrado para realizar cualquier tipo de geometría sin requerir puntos de unión.

Uno de estos procedimientos se refiere a la técnica funicular⁴⁶, gracias a ella surgieron nuevas expresiones formales/estructurales

⁴⁶ Consiste en adoptar la forma del polígono funicular de las cargas como eje geométrico de la estructura. En su posición original y tratándose de cargas de gravedad, se tendrá una estructura de tracción pura; en su posición invertida, será una estructura de compresión pura para esas mismas cargas.

constituidas por redes de cables o cuerdas, las cuales, debido a su naturaleza, carecen de rigidez y por tanto, únicamente pueden absorber esfuerzos de tracción. Estos cables sometidos a un conjunto de cargas puntuales adoptan una forma curva determinada en cumplimiento de las leyes de equilibrio.

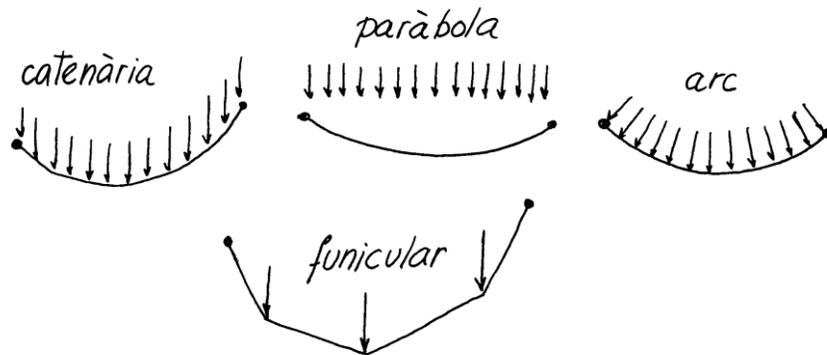


Fig. 4. Tipos de curvas.

Las nuevas sensibilidades constructivas para modelos antifuniculares tienen en Gaudí a su mejor y más celebre mentor, como el genio precursor que representa. Su modelo de sistema antifunicular planteó intensas y variadas experimentaciones constructivas de las cuales surgirían nuevas formas geométricas, siendo éstas el precedente de las expresiones estructurales venideras. Los idearios constructivos gaudinianos para la concepción de innovadoras geometrías sirven como base a las tareas creativas actuales para fecundar muestras excepcionales de técnicas constructivas.

Aun cuando los encofrados textiles para hormigón se basan en un procedimiento arquitectónico romano, se ha llevado a cabo, una

Oscar A. Andrés y Néstor F. Ortega, “*Extensión de la técnica funicular de Gaudí a la concepción y génesis de superficies estructurales*”, 13.

revisión progresiva de los sistemas antifuniculares de doble curvatura debido en gran medida al desarrollo de herramientas interactivas las cuales hacen viable la exploración en tiempo real de dichas redes. Algunos de estos instrumentos se refieren a Thrust Network Analysis (TNA), Rhino VAULT o COMPAS. Tal situación garantiza su reintroducción al ámbito edificatorio actual sin las inversiones de mano de obra y recursos típicamente asociadas a estructuras antifuniculares convencionales.

La técnica de encofrado textil (*fabric formworks*) se inserta entre Knitcrete y Cable-net. La configuración entre una red de cables antifuniculares de acero y sus respectivos nodos, así como el encofrado textil, la pulverización del concreto y la red de andamios conforman un sistema edificatorio que, aunque sumamente novedoso ya había sido cimentado por constructores como Otto y el mismo Gaudí. El sistema estructural textil híbrido está compuesto por superficies de tracción que operan en equilibrio con redes de elementos doblados elásticamente.

Para esta metodología, el encofrado ofrece un control sobre la forma, de modo que su optimización mejora el comportamiento estructural y otros criterios en comparación con las geometrías tradicionales. La condición híbrida a la que está sujeta esta metodología se compone de membranas de tracción y redes de acero doblados elásticamente (flexión activa). El tejido de punto 3D se lleva a cabo mediante *weft knitting manufacturing technologies*. Esta técnica textil es posible debido a intarsia, un procedimiento que permite grados de variación en el entrelazado de las hiladas.

Investigadores en ETH Zürich⁴⁷ han llevado a cabo la fabricación de una membrana (prototipo) anticlástica de doble curvatura de hormigón reforzado con fibras de carbono y encofrado textil 3D: **Hilo** (High Performance - Low Emissions). Este sistema de bóvedas es una unidad dúplex de 16×9 m, en Dübendorf, Suiza, se convertirá en la membrana que cubra (el cierre horizontal) Nest, (Next Evolution in Sustainable Building Technologies), una estructura dividida en 3 plataformas, en la cual tanto los materiales como las técnicas de fabricación se evalúan en condiciones reales para su futuro uso comercial.



Fig. 5. Membrana Hilo

HiLo es una membrana generada mediante una parábola gaussiana de curvatura negativa de 29 ton. tipo sándwich de concreto reforzado con fibra de carbono, sostenida sobre 5 soportes, con capas de material de entre 3 y 5 cm (espaciadas 10 cm entre ellas por bloques de aislamiento, con un núcleo rígido de poliuretano) y reforzada con malla de acero de refuerzo⁴⁸ y varillas verticales de tensión. Cubre

⁴⁷ En el campus de los Laboratorios Federales Suizos de Ciencia y Tecnología de Materiales (Empa).

⁴⁸ El tipo de acero se eligió en base a su similitud con el mencionado en el código americano para ferrocemento, ACI 549.1R-93. Las capas de malla

una superficie de 120 m². Su grosor varía entre 3 y 30 cm, 8 cm en promedio. El proceso de optimización de la membrana previó criterios de tensión y deflexión, así como factor de carga de pandeo, desviación del encofrado, etc. Los investigadores dicen haber evaluado 10,000 formas potenciales de membranas.

El prototipo a escala real se construyó en el Laboratorio de Fabricación Robótica del Instituto de Tecnología en Arquitectura ETH Zürich. El análisis estructural se llevó a cabo mediante COMPAS. Fue fabricada mediante un núcleo de poliuretano cubierto con una red de cables – individuales, conectados por nodos - de acero a flexión activa - en andamios reutilizables de madera de fabricación CNC –. Sobre esta red se despliega un textil para recibir sucesivas capas de concreto pulverizado con fratasadoras vibratorias eléctricas para compactar y nivelar el material, cuyos espesores varían entre 3 y 30 cm. Se tensa a partir de una viga delimitadora de madera reutilizable, que a su vez se apoya en elementos de andamio de acero convencionales.

La membrana es rociada manualmente con una fina capa de cemento de aluminato de calcio reforzado con fibras de vidrio de fraguado rápido, lo cual tensa al textil y minimiza las probabilidades de deformaciones. A partir de este punto se realiza el “colado” mediante la aplicación de capas graduales de concreto, logrando finalmente una membrana estructuralmente eficiente. Durante esta etapa del proyecto es necesario una correcta pulverización de las capas del concreto sobre el encofrado de tela. En este sentido el termino pulverización no se refiere a la formación de polvo causado por la

son de 1 mm de diámetro, con una separación de 13 mm, es decir, 60 mm²/m por dirección, con hasta 12 capas por cara de hormigón.

<https://supermanoeuvre.com/NEST-HiLo>⁴⁸

desintegración de la superficie de dicho material, sino que es una solución tecnológica mecanizada para proyectar hacia la superficie deseada el concreto desde la boquilla de una pistola. El patrón de la estructura de la red de cables:

...es una malla cuádruple que consta de cinco parches y con cinco vértices...Estas líneas principales (columna vertebral), que controlan la geometría general de la red de cables, son en gran parte responsables de generar pretensado y soportan la mayor parte de las fuerzas generadas por el peso del hormigón. La densidad del patrón está diseñada para reducir el número de segmentos y nudos de amarre, así como controlar los costos y el tiempo de fabricación y evitar la congestión de los embudos hacia los soportes mientras se mantienen tamaños de cara aceptablemente pequeños en las regiones centrales de la red.⁴⁹

Para su óptima fabricación, se discretizó en secciones:

...la mencionada teoría de cables, regulables y de bloqueo rápido, sirvió de soporte a un tejido polimérico, este último un nuevo encofrado para el vertido en obra del hormigón fibroreforzado. Los nodos fueron diseñados con el objetivo de asegurar que el cable tuviera los grados de libertad necesarios para la constitución de la red. Esta ventaja de construcción también permitió que el área

⁴⁹ Tomás Méndez Echenagucia et al. “A Cable-Net and Fabric Formwork System for the Construction of Concrete Shells: Design, Fabrication and Construction of a Full Scale Prototype”, *Structures 18*, (2018): 76, doi: 10.1016/j.istruc.2018.10.004

subyacente estuviera relativamente libre de nervaduras o puntales, lo que permitió que continuara cualquier trabajo en progreso.⁵⁰

El patrón o red de cables contiene 94 puntos de anclaje, 2,015 segmentos de cables (*splines*), 957 caras y 953 nodos. Los algoritmos utilizados en este desarrollo aseguran que las fuerzas se distribuyan correctamente entre los cables de acero para que el cascarón asuma la forma deseada con precisión. La red de cable pesa 500 kg y la tela 300 kg; así, con un total de 800 kg de material se soportan las 20 toneladas de concreto húmedo, es decir soporta 25 veces su propio peso.

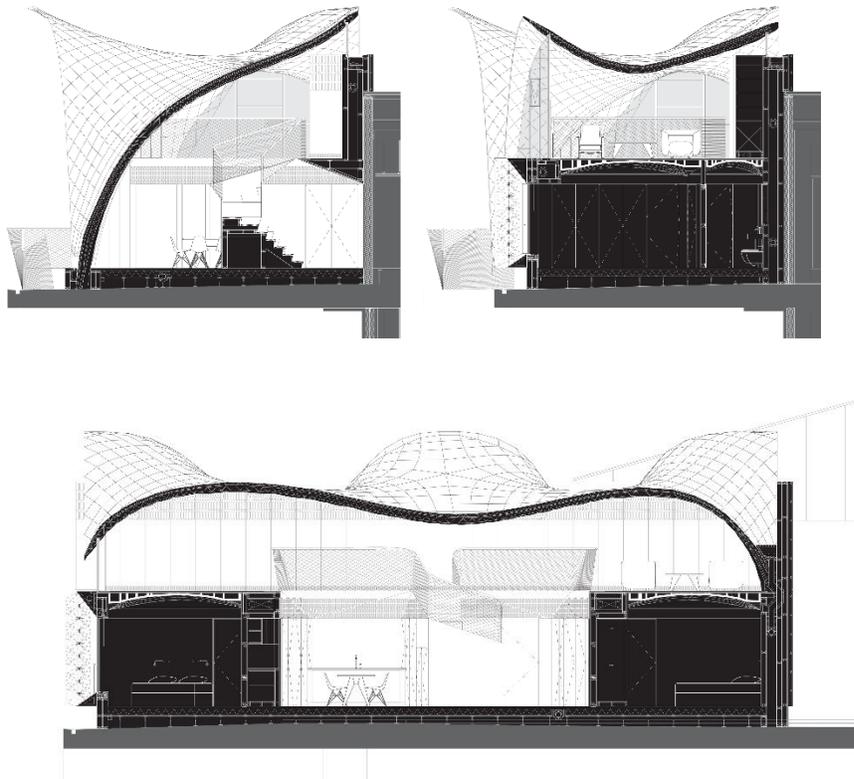


Fig. 6.Hilo, secciones. <https://supermanoeuvre.com/NEST-HiLo>

⁵⁰ Fabrizio Aimar. 24 Noviembre 2017.

<https://www.teknoring.com/news/ingegneria-strutturale/copertura-autoportante-e-doppia-curvatura-nest-hilo-delleth-zurich/>

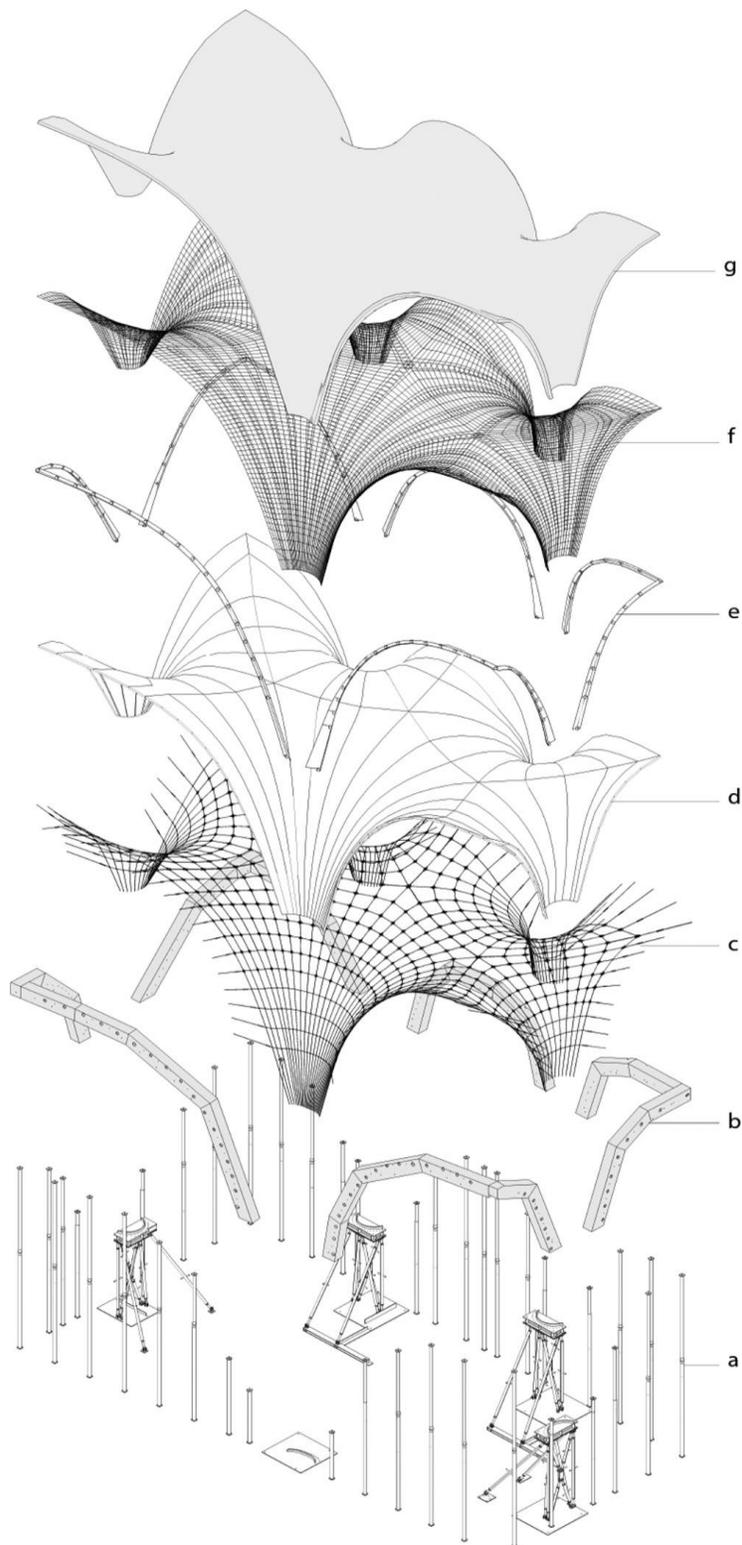


Fig. 7. Hilo. Vista axonométrica del sistema de encofrado de red de cables y textil.

Las posibilidades para el diseño y fabricación de encofrados textiles 3D mediante patronajes distintivos de los procesos sartoriales conllevan una perspectiva aleccionadora para los procedimientos de construcción en arquitectura respecto a los nuevos usos de materiales tradicionales y la creación de morfologías orgánicas, ello ha modificado las formas convencionales de construir con concreto. Las técnicas arquitectónicas para cimbrar mediante tejidos de punto 3D podrían establecerse como un catálogo para formas prefabricadas listas para encofrar.

Las estructuras de hormigón no estándar requieren encofrados personalizados que suelen utilizar grandes cantidades de madera u otros materiales. HiLo replantea el diseño y la fabricación de membranas mediante una novedosa posibilidad que combina los conocimientos textiles tradicionales con los métodos de diseño computacional y robotización en la construcción. Además, se optimizó la cantidad de cables y nodos, así como del encofrado (sistema textil/red de cables) y el mismo concreto.

Finalmente, Hilo aporta una red de tuberías hidrónicas en su exterior, lo cual aporta un sistema de calefacción y refrigeración integrado, como parte de las mejoras en el rendimiento energético.

El diseño computacional contribuye a generar geometrías estructurales innovadoras, ello apunta a la reducción de los materiales, sin embargo, el desafío se centra en la fabricación. Una vez que se encuentra la técnica constructiva correcta, de podrán abordar temas para solucionar la densidad en las ciudades, por ejemplo, a través de la extensión horizontal de los edificios, agregando este tipo de membranas.

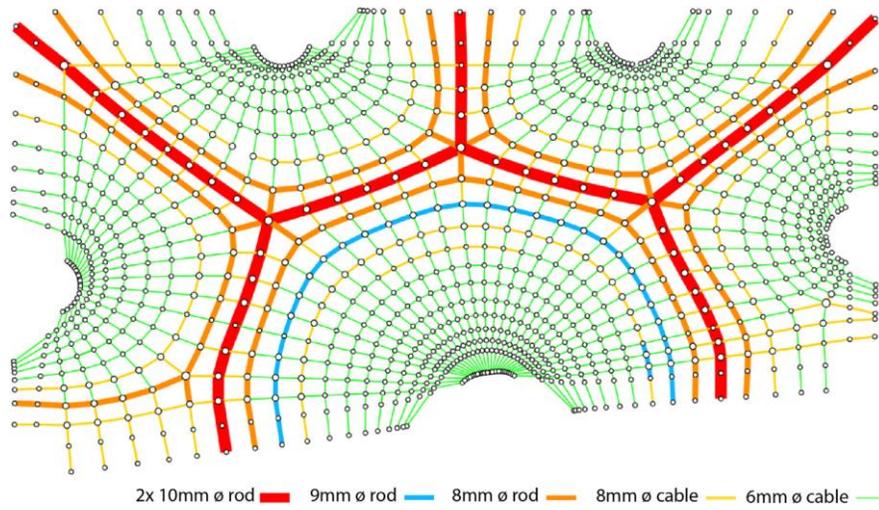
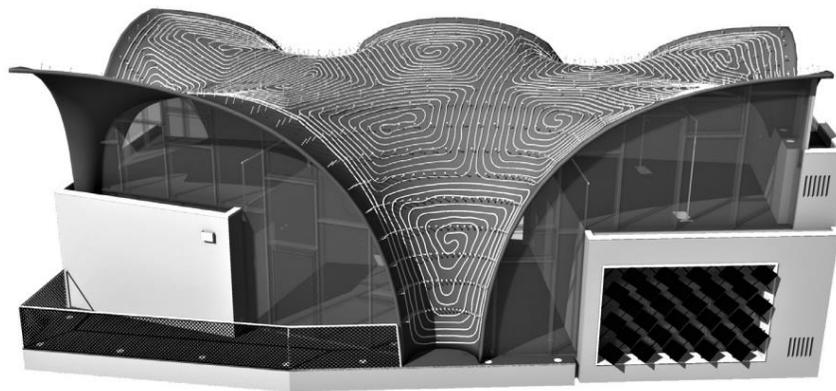


Fig. 8. Hilo, mallas.

Losas inteligentes (*Smarts slabs*)

Nos enfrentamos a una creciente actividad de construcción en todo el mundo, mientras que nuestros recursos son limitados. Mediante la impresión 3D de encofrados para la colada de hormigón, podemos combinar las ventajas de la fabricación adicional para la producción de geometrías muy complejas con las excelentes propiedades estáticas del hormigón. Esto nos permite optimizar la forma de los elementos de hormigón y utilizar el material de manera más eficiente.⁵¹

La atención significativa que recientemente se ha otorgado a problemas de índole medioambiental a los que nos enfrentamos desde hace tiempo y los cuales repercuten de manera gradual pero cada vez con mayores efectos nocivos en nuestros ecosistemas, se ha encausado a reflexionar sobre la eficiencia de los materiales de construcción, particularmente del concreto armado desde etapas iniciales del diseño, ello está directamente relacionado con la innovación de las técnicas constructivas.

Las técnicas de colado convencionales (un molde rígido en el que se vierte el hormigón) permiten el desarrollo de geometrías de ortogonalidad ortodoxa y con personalización limitada. Las losas de concreto como volúmenes habitualmente rectangulares y monolíticos requieren un alto porcentaje del total del material utilizado en una edificación, pero debido a la tecnología disruptiva de la impresión 3D es posible que mediante optimización topológica se ahorre una enorme cantidad de material por medio de la adaptación eficiente de los grosores según requiera la resistencia del elemento a diseñar.

⁵¹ <https://www.voxeljet.de/case-studies/architektur/intelligente-3d-gedruckte-betonschlalungen-smart-slab/>

La optimización topológica es un proceso computacional iterativo que funciona dentro de un espacio confinado y discretizado. Para cargas y soportes dados, el algoritmo refinará la distribución del material para cumplir con un conjunto prescrito de objetivos de rendimiento. Hay una serie de diferentes algoritmos de optimización de topología, que incluyen Microestructura isotrópica sólida con penalización (SIMP), Optimización estructural evolutiva (ESO) y Derivados topológicos. A pesar de las diferencias computacionales entre estos algoritmos, todos producen una familia de características geométricas típicas: redes interconectadas de nervaduras delgadas y estructuras tubulares estrechas con cambios dinámicos en la porosidad.⁵²

Valga decir entonces que, la optimización de la topología consiste en un método de diseño para reducir los materiales sin afectar la funcionalidad ni el desempeño estructural del elemento arquitectónico. Aun cuando la industria de la construcción destina mucho de su presupuesto a las losas, no se ha adoptado esta metodología, en parte porque sus resultados geoméricamente complejos son aparentemente de difícil fabricación:

Los algoritmos de optimización de topología pueden distribuir material en las configuraciones espaciales más eficientes para minimizar las deflexiones bajo el caso de carga de diseño dado. La reducción de peso puede conducir indirectamente a un mayor ahorro de material en la estructura vertical y los cimientos, disminuyendo así adicionalmente la energía incorporada de los edificios. Estas losas funcionalmente integradas y eficientes en materiales se pueden modelar

⁵² 3D-Printed Stay-in-Place Formwork for Topologically Optimized Concrete Slabs, 98.

fácilmente en un entorno digital, pero su complejidad plantea desafíos de fabricación.⁵³

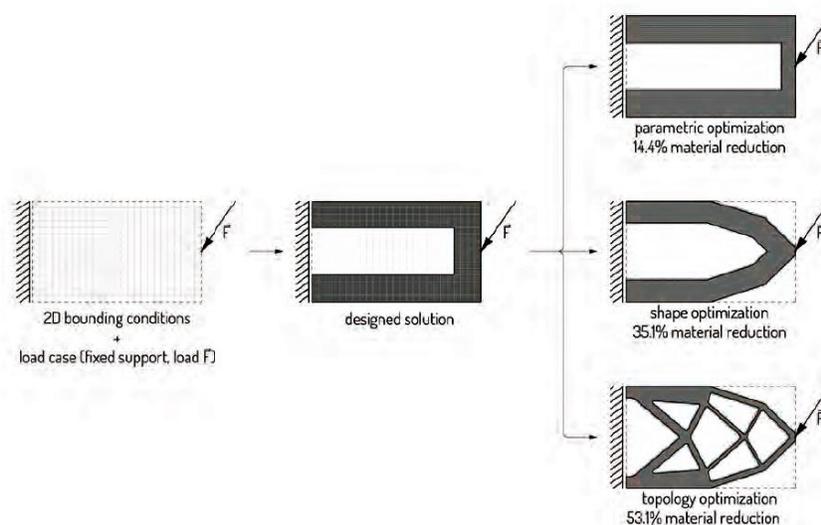


Fig. 9. Optimización topológica.

A la luz de los hechos, el aligeramiento de estos elementos se ha llevado a cabo gracias a un abanico de posibilidades constructivas en donde son destacables las obras de abovedamiento tardo góticas. En éstas se multiplicaron los arcos de las bóvedas hasta lograr la concatenación de una trama reticular que lograba cubrir claros de mayor amplitud debido al acrecentamiento en número de nervios entrelazados para una óptima transmisión de cargas; todas resueltas como casos únicos, ya que lograron definir sus propios principios plásticos dentro de un marco geométrico/matemático. Aun cuando existen encofrados fabricados en serie para losas nervadas o reticulares, como contenedores de plástico para crear grandes vacíos dentro de las losas de hormigón, son necesarias maneras personalizadas para encofrar y dar solución al diseño paramétrico.

⁵³ Ana Anton et al. Fast Complexity: Additive Manufacturing for Prefabricated Concrete Slabs. *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication* 28. Sprin (2020): 2, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_102

Las membranas aquí presentadas abarcan claros de grandes amplitudes gracias a sus múltiples curvaturas. Las losas se diseccionan en patrones discretizados, lo cual favorece a su producción y ensamblaje. Ello incentiva la reincorporación de las visiones constructivas tardomedievales a la arquitectura actual, puntualmente en las losas de entrepiso, las cuales han atravesado por procesos varios en aras de incrementar su productividad.

Ante este escenario tan vasto y complejo que representa todo un periodo histórico artístico como es el Medioevo, cabe resaltar que, anclados en las viejas tradiciones edificatorias se han constituido ideas erróneas sobre dicho acontecer constructivo, respecto a asimilar a todos los abovedamientos góticos bajo un mismo modelo estructural/plástico. La enorme variedad de tipos, de materiales y técnicas que aprovechan de mejor manera los diferentes recursos, desmitifica este ideal de unicidad gótica. Uno de los puntos en común se refiere los nervios en las bóvedas de crucería y argamasa tardo góticas, cuya función estriba, según Leopoldo Torres Balbás, en:

...ayudar a la construcción sirviendo de cimbras provisionales; facilitar el trazado de la bóveda, dándole forma, moldeándola; producir un determinado efecto plástico...No son cimbras permanentes, pero lo fueron provisionalmente; no sostienen hoy la bóveda, pero contribuyeron a soportarla durante algún tiempo⁵⁴

En las losas nervadas impresas en hormigón se depone lo estrictamente necesario para que pueda cumplir óptimamente sus funciones de carga y resistencia. Esta metodología ha fraguado una

⁵⁴ Zaragoza Catalán Arturo. A propósito de las bóvedas de crucería y otras bóvedas medievales. *Anales de Historia del Arte* (2009), Volumen Extraordinario 99-126, 104.

tipología de losas de filigrana que se asemejan a la tradición artesanal orfebre. En esta correlación entre la capacidad estructural de las losas de entrepiso nervadas con los encofrados impresos ¿Cómo puede la impresión 3D mejorar la eficiencia material de las losas a la vez que abarca un sector de formalidades novedosas?



Fig. 10. Losa de concreto Smart slab.

Fig. 11. King's Chapel, Cambridge.

En los procesos de extrusión 3D para losas nervadas de concreto, los nervios cumplen un rol protagónico, sin los cuales la losa no desempeñaría cabalmente sus funciones mecánicas. De igual manera resulta imprescindible el sistema de tendones de refuerzo de acero postensado, así como una malla de fibra de carbono para el control de grietas por retracción.

Encofrados flexibles 3D para losas inteligentes

Denominadas así por la integración del mínimo material con el máximo desempeño, iniciaron su desarrollo hace apenas un par de años con la técnica **Fast Complexity: Additive Manufacturing for Prefabricated Concrete Slabs** (bajo la iniciativa NCCR Digital Fabrication, de ETH Zürich). Las resultantes losas optimizadas mediante diseño algorítmico conllevan el reto de encofrar. Sus encofrados serán con un alto grado de detalle y con geometrías complejas, sin embargo, este desafío podrá ser resuelto con los métodos adecuados de fabricación, tal como los encofrados textiles.



Fig. 12. Concrete slab. Fast complexity.

http://papers.cumincad.org/data/works/att/acadia20_236p.pdf

Fast Complexity es un prototipo, de losa de 2m² de cemento Portland con un acelerador de aluminato de calcio discretizada en dos módulos de 1m² cada uno. Es un extracto de un sistema de losa estructural postensada con una retícula bidireccional de nervaduras estructurales (fabricada con 3DCP) y 20 mm de espesor. La técnica representa una amalgama manual/robótico que combina 2 sistemas de fabricación aditiva, **encofrados impresos 3D reutilizables (3D-printed formwork, 3DPF)** fabricados a través de Binder Jetting (BJ) e **impresión 3D de hormigón (3D concrete printing, 3DCP)**. Ofrece una deposición rápida para los elementos estructurales mediante

inyección de aglomerante. 3DPF se usa selectivamente solo donde se necesitan superficies de concreto de alta calidad, mientras que todas las otras superficies se fabrican con 3DCP.

Uno de los objetivos es explorar las posibilidades arquitectónicas en la prefabricación de losas optimizadas, (geometrías complejas y altamente detalladas). Sus morfologías requieren la introducción de novedosas técnicas para cimbrar, por tanto, también sus encofrados son de arenisca 3D:

Este enfoque explora la sinergia entre la flexibilidad geométrica de los encofrados de arena de impresión 3D y la capacidad estructural del hormigón. Permite la producción de componentes compuestos con propiedades superiores a cualquiera de los materiales individuales.⁵⁵

Primero se fabrica un encofrado reutilizable, usando BJ, para posteriormente imprimir la losa directamente. Así, se combina la precisión de BJ con la velocidad de 3DCP.

BJ es un método iterativo de impresión 3D “La impresión por chorro de aglutinante es una tecnología de fabricación aditiva que utiliza la aplicación selectiva de fluidos aglutinantes para unir materiales en polvo en capas.”⁵⁶ Es inyectado a través de un cabezal de impresión, el cual replica secuencialmente un modelo 3D.

⁵⁵ The smart takes from the strong: 3d printing stay-in-place formwork for concrete slab construction, 2.

⁵⁶ <https://www.voxeljet.com/additive-manufacturing/3d-printing-processes/binder-jetting-technology/>

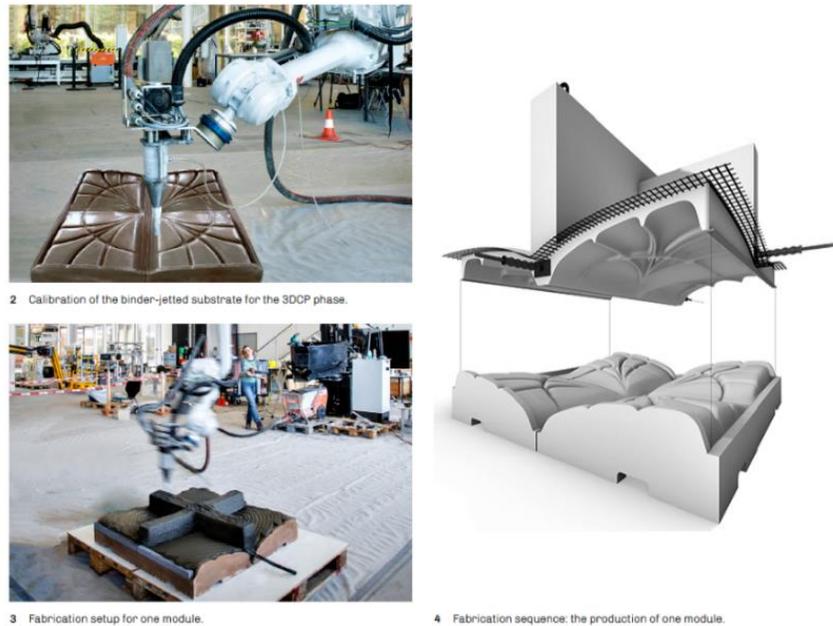


Fig. 13. Concrete slab. Fast complexity
http://papers.cumincad.org/data/works/att/acadia20_236p.pdf

Una vez finalizado el proceso, las partículas de arena aglomerada restantes son eliminadas con un chorro de agua ya que requiere presiones superiores a 3000 atm. Técnicamente, cualquier material en polvo que se pueda unir como cemento, plásticos, cerámica, metales, arena, azúcar, yeso, etc. pueden ser utilizados.⁵⁷ Los moldes se pueden imprimir a una resolución en el rango de una décima de milímetro y en un volumen máximo de 8m³.

El proceso emplea un sistema de dos componentes, cemento Portland

⁵⁷ Aghaei Meibodi Mania, Mathias Bernhard, Andrei Jipa y Benjamin Dillenburger. The smart takes from the strong. 3d printing stay-in-place formwork for concrete slab construction, *FABRICATE* (2017), 212.

Ordinario (OPC)⁵⁸ como mortero y pasta de cemento de aluminato de calcio (CAC)⁵⁹ como activador. Ambos se mezclan previo a la extrusión. Aun cuando la arenisca trabaja bien a compresión, su resistencia es baja a la flexión, sin embargo, como encofrados en conjunto con el hormigón, podrían resultar en una amalgama que combina la flexibilidad geométrica de la arenisca 3D y la capacidad estructural del hormigón.

Al prototipo se incorporan manualmente, tendones de postensado en las costillas y una malla continua de fibra de carbono para controlar grietas de contracción. Fast Complexity presenta dos superficies de diferentes calidades, reflejando las resoluciones específicas de los dos procesos de fabricación. Finalmente, una vez desencofrada, se aplica una capa impermeabilizante de poliéster. Respecto al molde, se puede reutilizar inmediatamente.

Aun cuando el genio Pier Luigi Nervi fue pionero en este tipo de losas, sus limitantes geométricas estaban definidas por sistemas de encofrados ortodoxos. Las Smart slabs actualizan estos principios de fabricación modular, pero mediante BJ y 3DCP logran mejorar su flexibilidad, su personalización y por ende su geometría para una mayor optimización.



Fig. 13.1. Pier Luigi Nervi. Losas nervadas.

Las viguetas se diferencian jerárquicamente en nervaduras principales, que tienen un canto de 50 cm y atraviesan el lado largo de la losa, y nervaduras secundarias, que tienen sólo 35 cm de canto. La superficie intersticial es una lámina de hormigón abovedada poco profunda de 20 mm de espesor. Para mayor rigidez, el caparazón está articulado con una red de nervaduras menores que siguen las líneas de tensión principales y brindan una estética distintiva para el sofito.⁶⁰

Encofrado de arenisca 3D para losa inteligente

La anterior metodología progresó hacia la técnica **3D-Printed Stay-in-Place Formwork for Topologically Optimized Concrete Slabs (PSPF)**. Es un método de fabricación aditiva que no es tan permisivo como la impresión 3D con chorro de aglomerante.

La losa, con un peso de 120 kg, corresponde a una losa maciza de apenas 3 cm de espesor y es un 70 % más ligera que una losa maciza de hormigón estándar que cubra la misma área. Para la fabricación de PSPF, las características geométricas se vuelven problemáticas a los 20 mm. aproximadamente.

El posprocesamiento implicó eliminar la arena suelta e infiltrarla en la superficie exterior de los encofrados impresos en 3D. Por lo tanto, la geometría y el diámetro de los huecos debían diseñarse de tal manera que facilitaran la eliminación de la arena suelta. También se estudió la delgadez del encofrado impreso en 3D en relación con el proceso de fabricación. Esta dimensión se probó de 6 a 10 mm, y se encontró que las paredes más delgadas eran inestables durante la remoción de arena suelta (debido a la erosión de los chorros de aire comprimido o la aspiración), así como durante la fundición (ya que la presión hidrostática se acumuló en canales más profundos y penetró los delgados muros de encofrado).

Con 1,8 m², el tamaño total de los componentes también se acercó a un límite en cuanto a la manipulación del encofrado y la estabilidad de la pieza impresa en 3D. Si bien las piezas más pequeñas pueden aumentar la complejidad del ensamblaje, son más fáciles de manejar. Por lo tanto, el dimensionamiento de las piezas es siempre un equilibrio entre el peso, el número de conexiones y los factores logísticos.

Las pruebas revelaron el hecho de que la naturaleza friable de la piedra arenisca impresa en 3D debe ser considerada cuidadosamente, especialmente cuando se amplía el proceso de fabricación y se fabrican componentes en volúmenes más grandes. Se probó con éxito una estrategia para evitar dañar el encofrado antes del vaciado mediante la integración de un lecho protector de arena no adherida contenida dentro de una caja impresa en 3D cerrada que también proporcionaba soporte auxiliar durante el vaciado.

Las operaciones de posprocesamiento específicas de las piezas impresas en 3D (es decir, aspirar arena suelta, infiltrarse en la superficie exterior de los encofrados) y las propiedades reológicas del hormigón dictaron las dimensiones mínimas para las características huecas. Las mezclas UHPFRC funcionan bien con canales impresos en 3D con diámetros tan bajos como 20 mm y radios de curvatura de 10 mm. Para características por debajo de estas dimensiones mínimas, el encofrado de piedra arenisca permanente puede asumir el papel de una superficie ornamental expuesta que no necesariamente transfiere todos los detalles al hormigón colado en el interior. Se ha programado un complemento completo de pruebas estructurales para la próxima etapa de la investigación, pero las pruebas empíricas realizadas hasta ahora mediante la aplicación de una carga distribuida de 2500 KN/m² en un componente de concreto con un espesor promedio de concreto de 30 mm fueron alentadoras.

El método propuesto avanza la idea de utilizar la impresión 3D como un método de fabricación indirecta para producir componentes de construcción compuestos con geometría elaborada. Las aplicaciones potenciales están en el ámbito de los componentes de construcción únicos y no estándar en lugar de la producción en masa. Si bien se necesitan más pruebas para cuantificar de manera concluyente las ventajas de este proceso de fabricación en comparación con otros, los prototipos han demostrado que el método es factible y tiene un

potencial significativo para su aplicación en arquitectura a mayor escala. Para las aplicaciones de este método a componentes de construcción a mayor escala, como techos completos, las estructuras deberían ensamblarse a partir de múltiples partes prefabricadas de la manera propuesta. Para demostrar que se pueden lograr grandes luces y voladizos, la investigación adicional debe abordar los siguientes desafíos:

El refuerzo fue suficiente para los prototipos más pequeños, pero para aumentar las capacidades estructurales, se deben considerar las barras de refuerzo tradicionales o las estrategias de pretensado. Una vez más, demostrando su idoneidad, la impresión 3D se puede utilizar para fabricar características de guía para la integración precisa del refuerzo.

Funcionalidad adicional: como consecuencia de la durabilidad de la unión entre hormigón y piedra arenisca, el encofrado impreso en 3D es ideal para permanecer en su lugar y albergar funciones adicionales. Es posible el tratamiento superficial acústico, la geometría reguladora de la transferencia de calor y la ornamentación detallada, así como la integración de cerramientos para servicios mecánicos y eléctricos.

Los resultados sugieren que los enfoques de fabricación indirecta se pueden generalizar a otros tipos de tecnologías de impresión 3D. La solución se basa en un proceso de fabricación híbrido en el que un material inteligente precioso se utiliza mínimamente, solo cuando es necesario, y se basa en otro material resistente para funcionar estructuralmente. La fabricación digital se utiliza para producir una pequeña proporción del producto final, pero tiene un gran impacto en su rendimiento y comportamiento.⁶¹

⁶¹ The smart takes from the strong: 3d printing stay-in-place formwork for concrete slab construction.

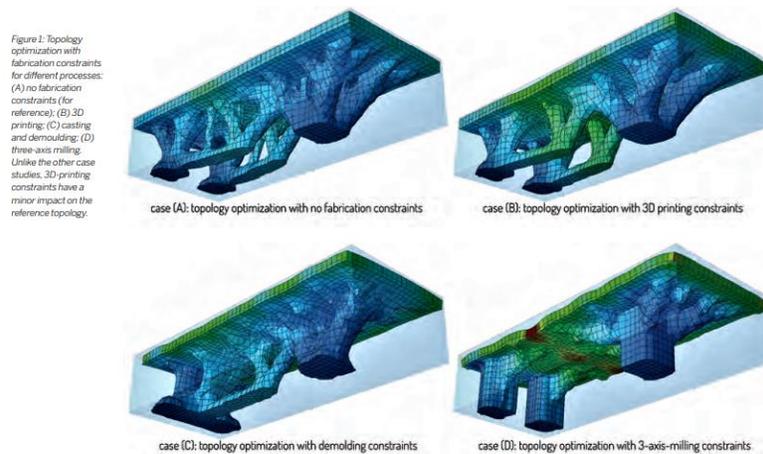


Fig. 14. Encofrado impreso en 3D para losas de hormigón topológicamente optimizadas. <https://dbt.arch.ethz.ch/project/topology-optimisation-concrete-slab/>

Desafortunadamente, la resistencia a la flexión del material es insuficiente en elementos a mayores tamaños, ello contribuyó para escalar hacia otro desarrollo en el cual se combinan el **concreto con fibras poliméricas de vidrio de ultra alto rendimiento (UHPFRC)**. Los objetivos perseguidos hasta entonces se refieren a la exploración arquitectónica de la fabricación aditiva para la prefabricación de componentes de construcción con geometrías altamente detalladas a escala 1:1.

No obstante, las aspiraciones aumentaron y bajo esta nueva mirada

que subyace a los fundamentos técnicos de la impresión 3D, la metodología cambió drásticamente al desistir a fabricar losas impresas para dar pauta a la impresión de sus encofrados. ¿Cómo usar las ventajas de la piedra arenisca impresa en 3D *in situ* y superar sus limitaciones para permitir la fabricación de componentes de construcción a gran escala? ¿Puede el encofrado impreso 3D ofrecer nuevas soluciones constructivas a viejos problemas?

Para continuar con la exploración de la impresión 3D de encofrados para el colado de losas optimizadas de concreto armado, Benjamin Dillenburger, arquitecto e investigador del Departamento de Arquitectura de ETH Zürich (D-ARCH) junto a su equipo y la empresa alemana voxeljet AG, desarrollaron **Smart Slab**, mediante una técnica de impresión a través del método Furan Direct Binding (FDB):

Un proceso de construcción en capas en el que la arena con un tamaño de grano promedio de 140 micras se une selectivamente con un aglutinante orgánico (resina de furano) a través de la polimerización.⁶²

El prototipo de losa fue diseñada con el algoritmo de optimización topológica SIMP (Solid Isotropic Modeling with Penalisation) de Simulia ABAQUS. Uno de los objetivos de esta investigación era reducir el volumen de material utilizado.

El desarrollo de las losas de optimización topológica, *smart slabs* o losas inteligentes se basan en cuatro procedimientos:

⁶² <https://www.voxeljet.de/case-studies/architektur/intelligente-3d-gedruckte-betonschlalungen-smart-slab/>

1. Los encofrados de arena impresos en 3D de alta resolución se seccionan en un proceso de discretización, por cuestiones técnicas de tamaño y peso.
2. Los encofrados de madera para definir la geometría de las nervaduras verticales fueron por corte láser con maquinaria CNC. Primeramente, se roció el hormigón reforzado con fibra sobre el encofrado de arena para producir la superficie finamente nervada de la capa inferior de hormigón para posteriormente colar el concreto restante en el encofrado de madera.
3. La inclusión de los tendones de acero postensado.
4. Los procesos de vaciado y fraguado.

Smart Slab es un prototipo de losa de concreto armado (a escala arquitectónica) optimizada topológicamente. Posee de 80 m² y 15 toneladas y fue discretizada en 136 segmentos. Su sistema de encofrado consta de 174 piezas 3D. La metodología utilizó 2 sistemas de encofrado diferentes:

A través de la impresora VoxelJet VX4000, se fabricaron piezas de arenisca de hasta 4x2x1m³ por medio de tecnología de impresión 3D inyección de aglomerante o Binder jetting:

...las capas de material en polvo se unen selectivamente mediante un chorro de resina. Este tipo de tecnología es especialmente adecuada para la fabricación de topologías optimizadas porque no implica el uso de soportes auxiliares al imprimir geometrías con socavaduras y vacíos internos; la cama de polvo no consolidado proporciona esta funcionalidad por defecto. El chorro de aglomerante produce acabados superficiales limpios y detalles precisos en el rango de 0,2 mm.⁶³

⁶³ 3D-Printed Stay-in-Place Formwork for Topologically Optimized

La losa fue fabricada utilizando un encofrado 3D de 9 mm de espesor, se estabilizó con un agente de infiltración superficial sintético.

El tamaño de estos componentes se debe al límite tanto en términos de manipulación del encofrado y la estabilidad de la impresión 3D. Cada uno puede soportar una carga de 100 kN/m² con un volumen de 6,000 m³. El elemento más grande de 1.8m tiene un volumen de aprox. 70 m³ y posee 20mm de grosor en su punto más delgado. Después del montaje del encofrado de arena impreso en 3D, la superficie de arena se infiltró con resina de poliéster para endurecerla y permitir la aplicación del desmoldeante inmediatamente antes de proyectar el hormigón.

Posteriormente, se fabricaron secciones de encofrados de madera contrachapada cortados con láser para las nervaduras de hormigón secundarias. Estos módulos se instalaron sobre el encofrado impreso en 3D una vez colocada la capa de hormigón proyectado.

El encofrado impreso en 3D BJ proporciona soporte para la superficie visiblemente optimizada del concreto, mientras que los paneles de madera CNC se utilizan para moldear las nervaduras secundarias, dado que son superficies planas. Incluye fibras poliméricas de vidrio para la mitigación de grietas por contracción y debido a su constitución:

La reducción de peso es posible porque, en lugar de ser planas, las losas son arqueadas en similitud con los techos abovedados de las catedrales góticas. Simplemente en virtud de su forma, pueden soportar cargas muy pesadas y, por lo tanto, no necesitan ser

reforzadas con acero de refuerzo.⁶⁴

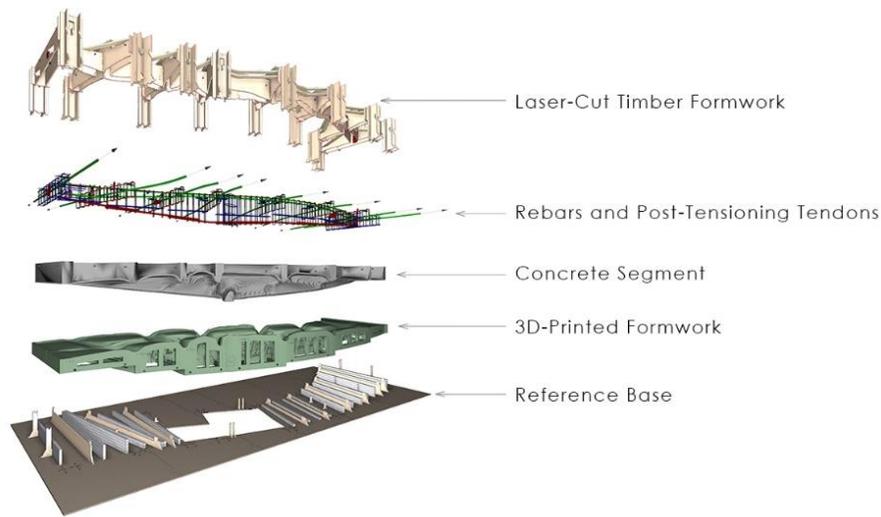


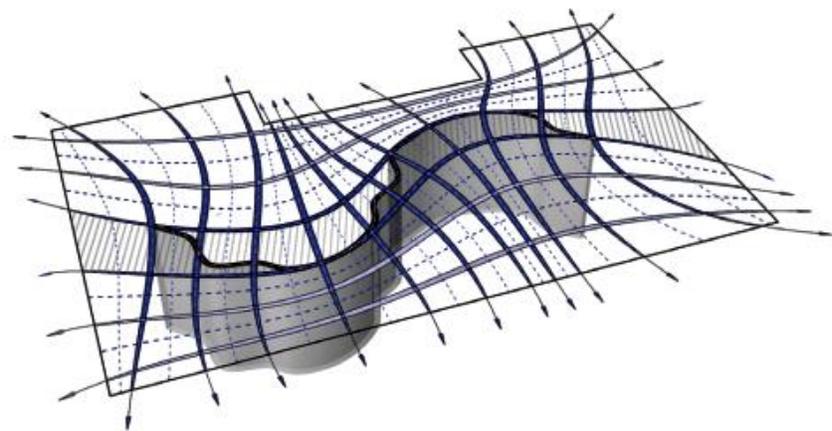
Fig. 15. The Smart slab. Procedimiento constructivo.

Los tipos de encofrado fueron reunidos por una tercera empresa, que primero roció el hormigón reforzado con fibra sobre el encofrado de arena para producir la superficie finamente acanalada de la capa inferior de hormigón y luego vertió el hormigón restante en el encofrado de madera, después de un proceso de endurecimiento de dos semanas, los 11 segmentos de concreto individuales estaban listos para ser instalados.

Esta estructura ornamental es jerarquizada mediante las vigas mayores de cargas, mientras que las de segundo orden fueron integradas como elementos acústicos. El sistema propuesto avanza la idea de usar la impresión 3D como un método indirecto de fabricación para producir componentes de construcción no estándar

⁶⁴ ETH Zürich, *Modern construction using long-forgotten techniques*, acceso el día 16 de agosto de 2019, <https://ethz.ch/content/main/en/news-and-events/eth-news/news/2017/04/modern-construction-using-long-forgotten-techniques.html>

con geometrías optimizadas. Los grosores varían en función de su alcance estructural dado su optimización topológica. Esta losa no fue dibujada, sino programada, ya que con los métodos análogos de cálculo hubiera sido imposible su resultante formal/estructural. Su morfología engloba una integración material y de rendimiento estructural, alcanza máximos en resistencia, así mismo es capaz además de incluir todas las instalaciones eléctricas



3

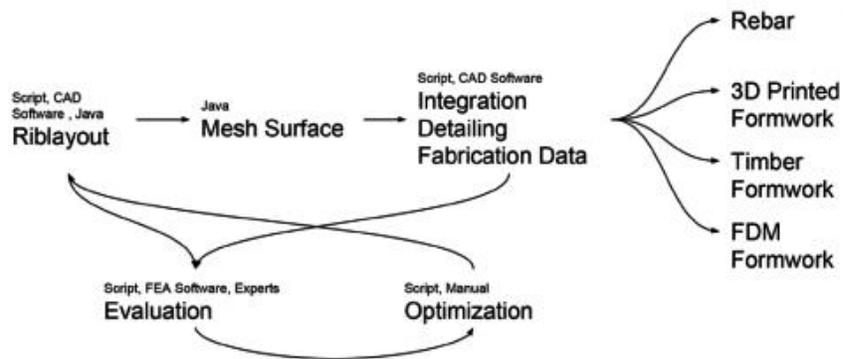


Fig. 16. Smart Slab. <https://dbt.arch.ethz.ch/project/smart-slab/>

Al ser moldes impresos en arenisca, el material puede ser reutilizado cuantas veces sea necesario para desarrollar nuevos encofrados. En tal sentido, la impresión 3D de componentes arquitectónicos se constituyen como elementos imprescindibles para perfeccionar la resolución, precisión, velocidad y optimización.

Las geometrías orgánicas y complejas resultantes de los procesos de optimización son especialmente aptas para ser resueltas mediante impresión 3D, tanto del elemento constructivo como de sus respectivos encofrados, en caso de requerirlos. En este sentido, también es importante apuntar que los métodos de fabricación aditiva varían en función de las necesidades de cada elemento, por ende, la combinación estratégica de diferentes métodos aportará proyectos mejor logrados. Las estrategias híbridas de prefabricación requieren significativamente menos labor manual, pero ello no conduce a la desaparición del obrero, sino que insta a modificar la cualificación de los trabajadores.

La membrana aquí presentada, consiguió unificar exitosamente, la impresión de aglomerante, el corte por láser CNC y la impresión 3D FDM, según las características geométricas/estructurales del encofrado. Esto demuestra que, los proyectos arquitectónicos contemporáneos están logrados en función de una serie de procesos de diseño y de fabricación conjuntos:

El proyecto Smart Slab muestra cómo en el futuro, un flujo de trabajo híbrido desde el diseño hasta la fabricación puede conducir a soluciones de diseño más expresivas y de mejor rendimiento sin necesidad de estandarización. Esta será la clave para crear un mayor impacto en la industria de la construcción y mejorar la calidad general de nuestro entorno construido.⁶⁵

⁶⁵ <https://www.designboom.com/architecture/dfab-house-concrete-smart-slab-eth-zurich-08-02-2018/>



Fig. 17. The Smart Slab.

Encofrado de losas hormigonadas antifuniculares

Las alternativas de diseño optimizadas, con formas funiculares, nervaduras diferenciadas, sofitos perfilados y secciones huecas utilizan significativamente menos material y además pueden integrar servicios de construcción dentro del espesor de la losa, como calefacción, refrigeración y ventilación. Sin embargo, tanto la geometría externa optimizada como la red interna de vacíos funcionales presentan desafíos de fabricación muy complejos para el concreto.⁶⁶

Para menguar las condicionantes negativas efectuadas en el medio ambiente por el uso desmedido del concreto, se ha optado por la impresión 3D, en este caso, por deposición fundida (FDM) para la fabricación de encofrados ultraligeros (15 kg para una losa de 660kg). Representa la mejor alternativa para salvar dentro de la losa misma de hormigón, un sistema de ductos para ventilación y otras instalaciones que benefician el funcionamiento de los edificios.

FDM es un sistema para encofrados permanentes, tiene un impacto ambiental insignificante y una contribución mínima respecto al peso total de la cubierta. Es una metodología más sostenible para la fabricación de losas antifuniculares de concreto. La capacidad de producción de estas losas se sustenta en los encofrados ahogados, ya que al fraguar es imposible su retiro.

⁶⁶ Jipa Andrei, Cristián Calvo Barentin, Gearóid Lydon, Matthias Rippmann, Georgia Chousou, Matteo Lomaglio, Arno Schlüter, Philippe Block y Benjamin Dillenburger. 3D-Printed Formwork for Integrated Funicular Concrete Slabs, 1.

Esta técnica fue probada en una losa prototipo de hormigón funicular integrado (IFCS) de $2,6 \text{ m} \times 2,6 \text{ m} \times 0,25 \text{ m}$. Para lograr el cometido se utilizaron tres sistemas, los cuales tienen en cuenta sus ventajas particulares y limitaciones geométricas:

- Paneles estándar para definir los lados planos del prototipo
- FDM para la losa y los conductos internos y
- Corte por hilo caliente CNC para la geometría de las nervaduras verticales.

...Los 84 huecos individuales se fabricaron utilizando 485 m³ de EPS, con un peso de alrededor de 10 kg en un cortador de alambre CNC de mesa giratoria de cuatro ejes personalizado. Ocupando el 65% del volumen de la losa, los bloques de EPS son un encofrado fijo que cumple la función de aislamiento térmico...El plafón de doble curvatura de la losa, con nervaduras ornamentales que reflejan el patrón de las nervaduras funiculares, se basó en un sistema de encofrado FDM desechable.⁶⁷



Fig. 18. 3D-Printed Formwork for Integrated Funicular Concrete Slabs.

Los conductos para el sistema de vigas activas, así como la carcasa para el serpentín hidrónico se fabricaron utilizando encofrado permanente impreso en 3D. La compleja red de conductos está

⁶⁷ Ibid.

diseñada para cruzar las nervaduras de hormigón verticales en ubicaciones estratégicas y distribuir la única entrada de aire a través de seis salidas más pequeñas en el espacio interior. La geometría resultante tiene conductos con secciones no circulares que varían entre 10 y 80 mm... El sistema de canalización también presenta una rejilla de nervaduras de refuerzo en su superficie externa que está en contacto con el hormigón. Esta rejilla, por un lado, rigidiza las tuberías para soportar la presión hidrostática y, por otro lado, aumenta el área de unión con el hormigón, evitando la delaminación por retracción del hormigón.⁶⁸

Los encofrados se discretizaron en 76 segmentos, fueron extruidos con ácido poliláctico (PLA), un polímero de base biológica que por tanto es fácilmente reciclable a través de impresoras comerciales en módulos de 30x30x60 cm. Esto da cuenta que en estas condiciones la producción de encofrado tradicional resulta innecesaria.

Debido al uso de la impresión 3D se desarrolla "...una jerarquía de estructuras y patrones sobre una amplia gama de escalas de longitud que no es posible con la mezcla y el vaciado tradicionales".⁶⁹ Tal situación ha reabastecido los sistemas constructivos a partir de un mismo guion: cubrir el mayor claro posible con el mínimo de material a partir de insumos tradicionales con técnicas innovadoras.

Estos manifiestos arquitectónicos decretan visiones únicas sobre el rol de lo tecnológico/constructivo bajo inquietudes creativas ya antes experimentadas, el ahorro de material. Para ello no basta en poner en

⁶⁸ Ibid, 5.

⁶⁹ Mohammad S. Khan, Florence Sanchez, and Hongyu Zhou. "3-D Printing of Concrete: Beyond Horizons", *Cement and concrete research* 133, (2020):12, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106070>

crisis la morfología ortogonal arquitectónica, sino que los cuestionamientos a los patrones plásticos en el diseño arquitectónico resultan en una excusa argumental para generar técnicas constructivas concordantes con nuestro tiempo. Esta renovación formal sumergida visualmente en los trazos rectores geométricos tardo medievales, trae consigo mejoras en temas espaciales, de acústica, energéticos, de instalaciones y desde luego en comodidades.

Las posibilidades que ofrece la tecnología a la práctica constructiva han superado las limitaciones formales de la fabricación tradicional para encausarse en una concepción organicista gracias al poder de la programación en arquitectura. Estas técnicas en las cuales se programan y fabrican losas con una cadencia rítmica aparentemente al azar y discordantes totalmente con sus pares ortodoxos encumbran a las losas como exoesqueletos de atípicas soluciones estructurales. Sus emparrillados de nervios suspendidos en una o dos superficies los cuales se rigen bajo los principios de discretización y optimización topológica tienen la capacidad de albergue en su espacio interno.

Estas losas prefabricadas capaces de minimizar la huella de carbono se constituyen en elementos de concreto armado aparente, de tramas irregulares y de semejanza fungiforme. Es imperceptible a primera vista un orden hegemónico rector que organice su composición. Despojadas del academicismo, estas losas caladas gozan de planteamientos plásticos artesanales de fabricación robotizada. El alto grado de detalle tanto en su vertido, encofrados, así como en sus acabados parece haber sido tallado dentro del barroco más exuberante.

Conclusión

La segunda década del S. XXI, cautivada por los desarrollos computacionales, inundó el mundo con la fabricación de proyectos arquitectónicos que huían de las tradiciones constructivas. En este contexto, los encofrados textiles han marcado una época de cambio que se articula mediante un argot único que fragmenta la concepción de arquitectura del futuro para consolidar proyectos más eficaces que reflejan la interacción de la tecnología con la arquitectura.

Como efecto colateral, se han desplegado una serie de escenarios que han trastocado a arquitectos influenciados por una pléyade de profesionistas, la reconstitución estilística que han aportado las técnicas constructivas robótico - computacionales obedece a conceptos de un nuevo entender de la arquitectura. Visto desde ese ángulo, estos prototipos gozan de una capacidad extraordinaria para plantear procedimientos constructivos nuevos desde una perspectiva estructural, material, pero también desde una vertiente de vanguardia del discurso plástico.

El hormigón ha resplandecido nuevamente por una serie circunstancial propiciada por el auge protagónico que las herramientas de fabricación desencadenaron. Una ola de revolucionarias metodologías que decantó en la obsolescencia de los que fueran los sistemas constructivos líderes del pasado inmediato han posicionado a exponentes hasta ahora experimentales que dan prioridad a la optimización en lugar de a la forma.

Si bien es cierto que las losas de entepiso han sido abordadas de la misma manera desde el S. XX, no cabe duda que ello ha cambiado recientemente debido a la atención enfocada en temas de sustentabilidad. El afán por ahondar en universos más ecológicos concordes con los signos de los tiempos actuales, han diversificado la manera de concebir las losas de

entrepiso. Son elementos estructurados mediante la cadencia lineal los cuales han trazado un camino para la gestación de esquemas edificatorios sin límites geométricos precisos. Las mutaciones formales que exhiben una ornamentación orgánica, compleja y aparentemente arbitraria y desarticulada, representan la estratificación tridimensional de detalles estructurales más que escultóricos. La lógica constructiva por la que se rigen nos remite visualmente a las nervaduras medievales, sin embargo la cadencia entre sus llenos y vacíos representan la perfecta dicotomía entre forma y optimización.

La alteración del formato de losa como cajón ortogonal se ha ejercitado con intersecciones transdisciplinarias en las que se traducen los criterios de programación más que de diseño. Mas allá de los rasgos morfológicos distintivos, dichas propuestas constructivas han esbozado esqueletos arquitectónicos llevados a la máxima síntesis. Desde luego que es importante enfatizarlas como referencias plásticas dado sus abundantes ángulos curvos, pero es fundamental señalar que dichos elementos constructivos se deben a notaciones matemáticas.

Tras un breve periodo embrionario, estas losas de entrepiso que desde el primer golpe de vista despiertan interés, han logrado codificar una consistente metodología que ha tomado un sendero alternativo argumentado por el funcionalismo computacional. Su geometría elemental condensa los objetivos de la optimización, la mínima expresión, mínimo peso, pero acrecentada en lenguaje y rigor constructivo. Estas formaciones conceptuales casi biológicas diseminan conceptos de rigor científico para establecer membranas absolutamente sintetizadas.

Respecto a los exoesqueletos de hormigón, las nervaduras aportan estabilidad estructural al edificio y llevan el material hasta su punto límite - en donde la piedra consigue su punto cúspide tectónicamente - el

precursor o pionero de esta serie de ensayos constructivos. La reinterpretación de la idea de osamenta de carácter arquitectónico con base en las obras góticas funge como clave creativa en las losas nervadas de manufactura robótica.

Al amparo de ello, las osamentas de cuna robótico-computacional que han protagonizado este escrito surgen en medio de una coyuntura que por un lado, ha diversificado las formas arquitectónicas a la vez que cohesionan el diseño con la fabricación, pero lo más importante es que han dado origen a técnicas constructivas sin precedentes en la historia de la construcción. Éstas, como deudoras del gótico, lideran los desarrollos formales que se alejan decididamente del rigor medieval para revelar nuevas plasticidades, nuevos sistemas estructurales y por ende nuevas morfologías.

Las geometrías resultantes reducidas drásticamente en el uso de concreto pero que mantienen la misma resistencia y capacidad de carga, o incluso la han superado, se han optimizado en aras de reducir significativamente las emisiones de Co2.

El gótico como elemento regente en las investigaciones a partir de las bóvedas de abanico pertenecientes a las crucerías tardomedievales y las bóvedas de ligadura o estrelladas, demuestran que las nervaduras góticas que siguen las líneas isostáticas derivadas del patrón de tensión principal complementan perfectamente con los planteamientos de fabricación robóticos.

A través de casi 2 siglos, ingenieros y diseñadores se han valido del concreto armado para satisfacer la demanda de estructuras de carga en la industria de la construcción. Para diversificar sus procesos de producción se han establecido estrategias de fabricación robótica, los cuales impulsan

a repensar estándares de mayor eficiencia que conllevan proyectos hacia elementos cada vez más esbeltos y de filigrana.

Dichos procesos de impresión 3D abren nuevos senderos para la colocación precisa de material. Pero también hacen referencia a obras con mayor eficiencia en términos de deposición de material, tanto en sus encofrados como en su constitución. En estos procedimientos, la aparente desnudez de la estructura carece de los añadidos comunes, ello se debe a la unificación estructura/piel. En estos exoesqueletos, la osamenta de un edificio gótico y su posible reconceptualización a través de la construcción, enmarcan la continuidad entre el dentro y fuera mediante una mínima expresión.

Las losas inteligentes, dado sus geometrías complejas poseen la capacidad de integración funcional respecto a calefacción y ventilación, recintos para conductos eléctricos, así como rociadores contra incendios, eficiencia material, (conlleva también un ahorro en cimentaciones) excelente desempeño estructural, ahorros en insumos, una atractiva e innovadora plasticidad y un término sumamente importante es la sustentabilidad en sus procesos de fabricación, tanto de los encofrados como del elementos constructivo resultante.

En términos de fabricación, presentan una serie beneficiosa para la industria, tales como mínimos riesgos de seguridad en las secuencias de ensamblaje de sus elementos discretizados, su control de calidad es significativamente superior que la producción manual. Ante esto, 3DPF aún debe investigar las fuerzas de presión hidrostática durante el proceso de colado, ya que sus encofrados submilimétricos son frágiles. La presión hidrostática es la tensión máxima ejercida uniformemente por el hormigón fluido sobre el encofrado. La presión hidrostática solo depende de la densidad del concreto. Conjuntamente, las geometrías pueden presentar

problemas de accesibilidad y con ello evitar que las varillas de refuerzo se coloquen óptimamente.

Aun cuando históricamente uno de los impulsores de la innovación de encofrados ha sido la modularidad para su posterior ensamblaje, hoy día estas innovaciones repercuten sistemáticamente en la construcción de manera general.

Cap. 3. Morfogénesis computacional: La naturaleza como modelo arquitectónico

La naturaleza ha sido una referencia para arquitectos, diseñadores e ingenieros mucho antes de que se establecieran sus respectivas disciplinas. Desde un punto de vista histórico, esta referencia se consideró antitéticamente, es decir, como una delimitación del entorno creado por el hombre de las fuerzas incontrolables de la naturaleza o sintéticamente donde el mundo socio-tecnológico no solo se ve como inseparable de la naturaleza, exhibiendo reglas similares y patrones, pero donde la naturaleza misma sirve como fuente de inspiración para el diseño y la tecnología.⁷⁰

La transdisciplinariedad entre biología, arquitectura, diseño computacional y brazos robóticos industriales implica las preguntas ¿Cómo contribuye la naturaleza al diseño arquitectónico?, ¿De qué manera se transfieren los principios mecánicos, estructurales, morfológicos y materiales propios de los organismos biológicos a la arquitectura?, ¿Cómo cerrar la brecha entre el modelo biológico a seguir y su implementación técnica?

Valdría apuntar que el término morfología se refiere al estudio de una forma concreta, mientras que la morfogénesis estudia la generación de estas formas. La forma como síntesis de eficiencia es el trabajo imperante en el mundo de la biología. Así bien, la distribución espacial celular es un proceso de auto organización interna de los sistemas biológicos, exento de gestiones exteriores. Cada forma se desarrolla con el mínimo material, pero el máximo desempeño, por

⁷⁰ Jakob Weigle, “Fibrous Morphologies Integrative design and fabrication of fibre-reinforced structures in architecture using robotic filament winding” *eCAADe 31 No. 1* (2013) Computation and Performance, 549.

tanto, si una función lo incumple, será desechada y sustituida inmediatamente. Este alto nivel de funcionalidad recae en enormes variaciones morfológicas. Los organismos han sido capaces de desarrollar elementos que los conforman con una enorme eficiencia, así, la biología ofrece un catálogo de referencias eficaces que la arquitectura necesita.

Contrastando con ello, la arquitectura se ha restringido formalmente en innumerables ocasiones a un trazo reticular dado las limitantes que conlleva la construcción de las formas que se alejan de estos cánones. Pese a que la búsqueda formal es una preocupación que ha existido desde el nacimiento de nuestra disciplina, es esta eficacia biológica lo que supera a la arquitectura formalista.

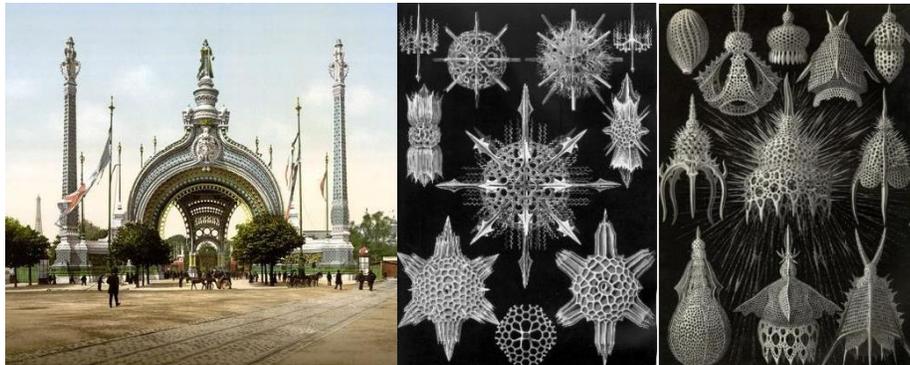


Fig. 19. Entrada principal a la Exposición Universal de París, 1900:

Fig. 20. Radiolarios, Haeckel.

El uso imperante del hierro en el S. XIX, se levantaron algunas edificaciones apegadas a esta tendencia biomimética que emulaban especies biológicas en la Feria Mundial de París de 1900. Entre éstas se encuentran El Palacio de la electricidad y castillo del agua, El Palacio de la luz y El Pabellón italiano.

A inicios de S. XX, Gaudí siempre con un enfoque naturalista experimentó también con formas biológicas al ensayar con la visión utópica de la arquitectura morfogenética. Por otro lado, Rene Binet en el libro *Esquisses Décoratives* (1900) reinterpretó diseños especulativos retomados de Ernst Haeckel quien a su vez recuperó y popularizó en Alemania el trabajo de Darwin, en el que prefiguraban formas sinusoidales, propias de los organismos biológicos.

Otro momento clave para estas investigaciones tuvo lugar en la década de los 60 del S. XX en la Universidad Técnica de Stuttgart (UTS), famosa desde entonces por estar en el corazón de la ingeniería alemana y reconocida como un centro especializado automotriz - Bosch, Daimler, Porsche, etc. - y aeroespacial en donde el concepto de ligereza es una ocupación fundamental. El ingeniero estructural y jefe del Instituto de Estructuras de Concreto de la UTS, Fritz Leonhardt, convocó a Frei Otto para dirigir el recién creado Instituto de Estructuras Ligeras (*The Institut für Leichte Flachentragwerke*, 1964-1991).

Otto, a partir de 1961, al lado del biólogo Johann-Gerhard Helmcke, reformuló los límites convencionales de las metodologías de diseño y construcción al generar una simbiosis entre ingeniería, biología y arquitectura trasportando al medio construido determinadas características de organizaciones biológicas como las arañas de mar, radiolarios y diatomeas. Esto fue posible gracias al análisis de fotografías estereoscópicas ampliadas hasta 50 mil veces de dichas organizaciones biológicas que "...reconocen los principios de las construcciones ligeras naturales y el significado de los procesos de autoformación en el desarrollo de las formas"⁷¹

⁷¹ María Mallo Zurdo. SISTEMAS RADIOLARIOS. GEOMETRÍAS Y

Las investigaciones sobre *formfinding* - técnica de diseño que utiliza la auto organización de sistemas materiales bajo la influencia de fuerzas extrínsecas - representan un radical cuestionamiento sobre los procesos canónicos de diseño y edificación establecidos desde el Renacimiento. Otto es uno de los arquitectos pioneros respecto a la innovación en sistemas constructivos mediante esta estrategia, pues consideraba esencial que sus formas fueran el resultado de profundas investigaciones de estática, de procesos lógicos de optimización tal como sucede en los organismos biológicos.

Dentro de sus principios teóricos, la forma y estructura surgen mediante las analogías de principios basados en el rendimiento y desempeño de organismos biológicos pre- seleccionados. Estos emprendimientos arquitectónicos bio-morfológicos conllevan múltiples denominaciones, pero concuerdan todos en que la adscripción de ciertas características de organismos, deberían ser transportadas a la arquitectura en aras de diversos beneficios. Dado lo anterior, se ha incluido el concepto de morfología arquitectónica performativa.

Los procesos informáticos de generación de formas *non standar* apegadas a las investigaciones de sistemas biológicos específicos con respecto a sus posibles aplicaciones arquitectónicas a través del avance de la biotecnología, definen técnicas edificatorias. En ese marco, la **biomimética** es una estrategia de imitación del diseño y procesos de los sistemas de carga de la naturaleza que permite

Arquitecturas derivadas. (Tesis doctoral inédita, Universidad Politécnica de Madrid, 2015), 12, <https://oa.upm.es/39863/>

transferir su comportamiento mecánico, su morfología y sus propiedades funcionales a la arquitectura a través de la tecnología.

La morfogénesis natural se caracteriza por la capacidad de un organismo de desarrollar una forma en respuesta a múltiples estímulos intrínsecos y extrínsecos, a menudo contradictorios. La forma resultante sintetiza estas condiciones en uno de los muchos posibles resultados robustos y adaptables en lugar de una solución de optimización única (Webster 1996). ...Las metodologías de diseño integrador buscan establecer procesos en la arquitectura que se asemejen a la morfogénesis natural, donde el material intrínseco y las lógicas de fabricación son impulsores del diseño generativo en lugar de receptores inertes de la forma. Esto crea un enfoque de diseño morfogenético de abajo hacia arriba, que sintetiza el material y las restricciones de fabricación a través del desarrollo de herramientas integradoras de diseño computacional.⁷²

Los organismos biológicos alcanzan su optimización estructural mediante la diferenciación local de sus características constitutivas, mientras que:

“Las tareas de optimización en la ciencia de la ingeniería se centran principalmente en la determinación de un conjunto de parámetros que producen el resultado más apto elegido entre una variedad de soluciones diferentes mediante la implementación de algoritmos deterministas que aseguran la convergencia al problema.”⁷³

⁷² Moritz Dörstelmann, Stefana Parascho, Marshall Prado, Achim Menges, Jan Knippers, “Integrative computational design methodologies for modular architectural fiber composite morphologies”, *Conference: ACADIA 2014 Design Agency* (2014): 220, doi: 10.13140/2.1.5186.0485

⁷³ *Ibíd.*

Otra de estas de estas denominaciones se refiere a la **morfogénesis natural**, en la cual:

Gracias a la tecnología computacional, la arquitectura ha sido capaz de replicar los sistemas existentes en la naturaleza para responder mejor a determinadas condiciones de rendimiento material, estructural, funcional y formal, ello contribuye al desarrollo de obras en la que la forma es la respuesta de las variables que las condicionan, es decir sus resultantes morfoespaciales son performativas. Achim Menges - director fundador del Instituto de Diseño y Construcción Computacional desde 2008 – teorizó que, el término performativo se refiere a la combinación de palabras entre forma y rendimiento. Según él, la producción arquitectónica morfogenética tiene 3 premisas:

1. Emergencia y morfogénesis: Técnicas matemáticas para modelar el surgimiento de formas y comportamientos de los sistemas complejos del mundo natural que se yuxtaponen con técnicas de búsqueda de formas para formas materiales estables y dinámicas.
2. Datos, genes y especiación: Geometría, el patrón y el comportamiento y la evolución computacional y material de las "poblaciones" y las "especies" de formas arquitectónicas con un comportamiento complejo.
3. Comportamiento, material y medio ambiente: Comportamiento adaptativo de los sistemas de materiales naturales y arquitectónicos y el potencial industrial para una integración perfecta de su diseño y producción.⁷⁴

⁷⁴ Achim Menges, "Polymorphism". *Architectural Design* 76 No. 2 (2006): 87, <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1002/ad.243>

La expresión **morfología arquitectónica performativa** - dentro del diseño computacional aplicado a la arquitectura - se refiere a “una noción derivada del término morfología funcional en biología y describe la capacidad de un sistema material arquitectónico para adaptarse morfológicamente a restricciones internas específicas e influencias externas efectivamente.”⁷⁵

La adopción de las innovaciones tecnológicas están desacopladas y su potencial está subutilizado. Para que permeen en nuestra industria - igual que lo sucedido con la llegada del acero a la edificación en el S.XIX como material evolutivo del hierro – es necesario impulsar las técnicas constructivas adecuadas. La creación del acero no fue lo único que propició la construcción de los rascacielos, los constructores desarrollaron un sistema constructivo específico para aprovecharlo correctamente.

Un sector minoritario del gremio de los arquitectos se ha concentrado en procesos de diseño y fabricación *open source* en conjunto con la interdisciplinaria, así como nuevas formas de colaboración hombre-máquina:

"La arquitectura se está refundando así misma, convirtiéndose en parte en una investigación experimental de geometrías topológicas, en parte una orquestación computacional de la producción del material

⁷⁵ Oliver David Krieg, “Performative Architectural Morphology. Robotically manufactured biomimetic finger-joined plate structures”. Respecting fragile places, eCAADe Conference Proceedings Vol. 29 (2011): 573, http://papers.cumincad.org/data/works/att/ecaade2011_035.content.pdf

robótico y en parte generativa, como la escultura cinemática del espacio." ⁷⁶

Aunado a ello, las TDCFR han desencadenado una sucesión secuencial de manifiestos sobre cómo construimos, para alentar a profesionistas a profundizar sus conocimientos en la naturaleza y las formas orgánicas que de ella emanan:

Muchas de estas estructuras, utilizadas por visionarios como R. Buckminster Fuller, parecen ser hoy mucho más sencillas de entender y especialmente posibles de explorar tridimensionalmente con las nuevas tecnologías de fabricación digital. Esto abre un espacio para revisitar, una posibilidad concreta para la comprensión y síntesis del funcionamiento de algunos sistemas naturales y su aplicación en productos y artefactos ⁷⁷.

La gestación de un movimiento arquitectónico basado en estructuras biológicas, el cual forja obras morfogénicas de una calidad plástica inédita, es una realidad actual, que sin embargo aún no logra entrar en ninguna clasificación taxonómica. Las obras que se desprenden de este nuevo periodo arquitectónico "...se caracterizan por geometrías altamente diferenciadas con variación local de las propiedades de los materiales." ⁷⁸

⁷⁶ Branko Koralevic, *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, (New Jersey: Spon Press, 2003), acceso el día 14 de diciembre 2019, <https://xdoc.mx/documents/5-morfogenesis-digital-y-arquitecturas-computacionales-5fe8172c9b80d>

⁷⁷ Ignacio Urbina Polo, "Ernst Haeckel: micro-geometría en Radiolarios", *DI-CONEXIONES (blog)*, 01 enero 2019, <http://www.di-conexiones.com/ernst-haeckel-micro-geometria-en-radiolarios/>

⁷⁸ ITECH. *Integrative Technologies & Architectural Design Research M.Sc. Programme*, Faculty of Architecture and Urban Planning, University

La comprensión y abstracción de los procesos de morfología estructural de organismos naturales como son los equinoideos, comúnmente conocidos como erizos de mar, de forma discoidal (dólares de arena), los cuales carecen de brazos y tienen un esqueleto externo cubierto por la epidermis y constituido por numerosas placas calcáreas unidas entre sí rígidamente formando un caparazón, ello ofrece nuevas perspectivas que pueden ser transferidas a técnicas constructivas.

Su disposición de placas trivalentes resiste perfectamente las fuerzas de corte actuantes a través de los bordes, por tanto, el sistema conectivo en forma de dedo resulta idóneo para engranar estas placas. Así, como analogía biológica, se diseñan sistemas conectivos varios para polígonos irregulares de madera, que a diferencia de las juntas de acero, poseen una alta capacidad estructural resistente al esfuerzo normal, a la cortante y las fuerzas de empuje laterales.

Es de suma importancia la investigación sobre los sistemas conectivos, dado *que* “las juntas en las membras o cascarones de madera debilitan su estructura ya que perturban su continuidad material y por tanto, su rigidez.”⁷⁹ En los sistemas biológicos, la morfología de placas es siempre convexa, dado que las cóncavas tienden a generar altas concentraciones de momentos de flexión. Ello permite el crecimiento de erizo “sin interferir con la transferencia de fuerzas estabilizadoras, ya que la dirección del crecimiento será

of Stuttgart, 2016/17, <https://www.itech.uni-stuttgart.de/>

⁷⁹ Li, Jian-Min y Jan Knippers, Segmental Timber Plate Shell for the Landesgartenschau Exhibition Hall in Schwäbisch Gmünd—the Application of Finger Joints in Plate Structures. *International Journal of Space Structures* 30, no. 2 (2015):132, doi: 10.1260/0266-3511.30.2.123

perpendicular a las líneas de corte, por lo tanto perpendicular a la dirección de las fuerzas de corte estabilizadoras.”⁸⁰

Gracias a análisis FEM, se descubrió que el comportamiento biomecánico tanto las placas como de las conexiones del erizo de mar dan como resultado una estructura estática y sin momentos de flexión. Otra de sus metas esenciales se refiere a la eliminación de moldes o soportes para estos casquetes prefabricados autoportantes, lo cual permite un ahorro sustancial de costos. Una manera de alcanzar este objetivo es mediante la teselación, subdivisión o discretización de las geometrías en su **morfo espacio maquínico**, es decir, la aproximación de superficies complejas doblemente curvadas a través de la subdivisión de poligonal. Para lograrlo fue necesario incluir un sistema conectivo que correspondiera con estos cascarones, sin deformarlos o debilitarlos.

En vista que los proyectos arquitectónicos actuales requieren una gran cantidad de información en términos estructurales, materiales, etc., un **enfoque de diseño computacional integrador** es esencial extrapolar los sistemas arquitectónicos con un aporte de material relativamente mínimo y con una amplia libertad geométrica; a ello se le denomina sistema material bio-informado, es decir, la abstracción y traducción de principios biológicos al orden arquitectónico en una lógica de diseño y fabricación.

En lo que va del S. XXI el sector de la construcción en madera ha crecido notablemente con el resurgimiento de sus técnicas

⁸⁰ Ricardo La Magna, “From Nature to Fabrication: Biomimetic Design Principles for the Production of Complex Spatial Structures”.

International Journal of Space Structures 28 n.º1 (2012): 7, doi:

<https://doi.org/10.1260/0266-3511.28.1.27>

constructivas, sin embargo, particularmente en esta última década el auge de los edificios completamente contruidos con madera ha expandido el rol de las membranas de madera, debido al buscado crecimiento horizontal. La variedad tipológica con diversas técnicas y manipulaciones materiales se establece como una especie de catalogo con una gama de propuestas estructurales, morfológicas, de diseño y fabricación las cuales se discretizan para obtener los rendimientos óptimos deseados.

Membranas biomiméticas de madera segmentada: del ebanista finisecular al artesano computacional

...los materiales no son receptáculos inertes para una forma cerebral impuesta desde el exterior, sino participantes activos en la génesis de la forma. Esto implica la existencia de materiales heterogéneos, con propiedades e idiosincrasias variables que el diseñador debe respetar y hacer parte integrante del diseño que, se sigue, no puede ser rutinizado⁸¹.

Uno de los problemas más urgentes que enfrenta el entorno construido es la falta de conciencia respecto a los contaminantes emitidos en la industria, el carbono exhalado en la fabricación del cemento - el material fabricado por el hombre más utilizado de la historia - lo convierte en uno de los más contaminantes. Pese a su asequibilidad y enorme plasticidad, así como a todas sus cualidades estructurales, la huella de carbono emitida en su fabricación ha alentado el uso de materiales alternativos con emisiones netas de CO2 lo más cercanas posible a cero.

La madera es uno de estos materiales esenciales para un futuro más sostenible en la arquitectura. Es un tejido biológico anisotrópico, “un sistema compuesto natural de fibras de celulosa incrustadas en una matriz de lignina de hemicelulosas caracterizada por una deformación relativamente alta en el momento de la rotura, es decir, alta capacidad con una rigidez relativamente baja”⁸², naturalmente renovable, reciclable, eficiente en energía y con CO2 positivo.

⁸¹ Manuel De Landa, “Philosophies of Design: The Case of Modelling Software” (Actar Barcelona, 2001), 132.

⁸² Achim Menges, “Integrative Design Computation: Integrating Material Behaviour and Robotic Manufacturing Processes in Computational Design for Performative Wood Constructions”. Proceedings of the 31th

La madera ha pasado por procesos varios, oscilando entre su aceptación absoluta en la era preindustrial (antes del S. XIX), pero también sufrió un abandono y exclusión de las vanguardias arquitectónicas en el S. XIX en virtud de la penetración del hierro y subsiguientemente del acero y en el S. XX dado el uso imperante del concreto armado. Recientemente se ha logrado una reintegración pausada en proyectos de altos aires tecnológicos.

Al considerar sus beneficios y posibilidades en la industria en términos constructivos se inició una serie de investigaciones alejadas completamente de las metodologías de diseño y fabricación ortodoxas, ello pone de manifiesto el interés en retomarla mediante nuevos sistemas edificatorios que desembocan en membranas de formas libres mediante el uso de madera laminada cruzada (CTL Cross Laminated Timber).

Los domos, de la palabra francesa *dôme* que significa cúpula o techo redondo, son superficies de revolución definidas por la rotación de una curva plana alrededor de un eje vertical. Son bóvedas semiesféricas, envolventes óptimas con una estabilidad estructural lograda por su geometría.

Aun cuando en la historia reciente de la arquitectura, las membranas de madera han estado representadas mayoritariamente por *gridshells* o estructuras de rejilla, tal situación se ha modificado a la postre con el desarrollo de una serie de membranas semiesféricas. En dicho contexto, la encomienda esencial de los desarrolladores consiste en la representación de la perfección y la armonía del orden natural,

Conference of the Association For Computer Aided Design In Architecture ACADIA, (Banff Canadá, 2011), 72.

dado la creencia que la naturaleza ejemplifica infaliblemente la fuente que exhorta a la referencia imperativa en modelos heredados de la biología.

Ante este panorama, la esfera refleja la máxima aproximación a una perfecta simetría. Pese a ello, las confluencias a ésta han acaecido previamente en esferoides o casquetes semiesféricos de madera segmentada con paneles que típicamente constan de tres, cinco o siete capas de dimensión orientados en ángulos rectos entre sí y luego unidos para formar paneles estructurales con resistencia excepcional, estabilidad y alta rigidez. Es posible que estos paneles de madera tengan la capacidad reemplazadora del concreto armado para posicionarse como soportes estructurales primarios y superen el rol de las estructuras de rejilla: Ofrecen múltiples ventajas como es su baja huella de carbono, su ligereza y elevada relación resistencia/peso, su ignifugidad, el poco gasto energético para su fabricación, transporte y puesta en obra, además de ser fácilmente manejable y mecanizable.

Los sistemas constructivos de estos armazones permiten un sinnúmero de posibilidades tanto edificatorias como geométricas. Las bóvedas como elemento constructivo, particularmente la de cañón corrido, para salvar amplios claros han existido desde los inicios de la arquitectura, esta bóveda de directriz semicircular que emerge como una sucesión de arcos interdependientes ha tenido claras y veloces mutaciones a lo largo del tiempo. Así surgieron una gran variedad de bóvedas y cúpulas con las que se plantearon nuevos retos tanto constructivos como de diseño. El Panteón de Agripa, la Cúpula de Brunelleschi o la iglesia de Santa Sofía son solo algunos de ejemplos constructivos sobresalientes.

Por otro lado, las bóvedas cilíndricas o estructuras laminares basadas en segmentos de casquete han sido referidas recientemente por una serie de factores como es su extraordinario funcionamiento estructural y su belleza plástica, aunado al poco material utilizado. Estas membranas han migrado de las convencionales formas circulares a morfologías de soluciones plásticas/estructurales hiper orgánicas producto de sus analogías, a la vez que han cambiado el uso del concreto armado por el de madera laminada dado que el primero:

Hacia muchos años que había determinado que las membranas de hormigón encontraban su límite económico y de lógica estructural en los 30 m de amplitud; hacerlas más grandes era posible pero escapaban a la sensatez y a la lógica de la resistencia de los materiales.⁸³

La materia prima acumulada en el caso concreto de la biología pretende reformular un entorno proyectual que había permanecido casi estático desde las propuestas de Frei Otto. Para tal efecto se ha instado a revisar de manera pormenorizada a determinados organismos y sus materiales compositivos los cuales detonaron un cambio en la creación de formas visualmente más auténticas, de mayores libertades formales, pero sobre todo de un manejo mucho más ambicioso en sus soluciones constructivas.

Las connotaciones biológicas han prefigurado los primeros testimonios de las renovadas y propositivas aspiraciones constructivas en favor de una pluralidad aún más diversificada en

⁸³ de Anda Alanís, Enrique X. *Candela 1910-1997. El dominio de los límites*. Taschen. Colonia, 2009,

<http://intranet.pogmacva.com/es/obras/62457>

los mecanismos edificatorios. Mas que un nuevo código estilístico, estas cualidades tectónicas articulatorias son las precursoras de una nueva asimilación constructiva, en el cual se despoja a la arquitectura de elementos innecesarios, no mediante la reproducción de las formas naturales, sino a través de la comprensión de las reglas que rigen esas formas.

En 2010 como depositarios del legado de Frei Otto, los institutos (ICD) The Department of Biobased Materials and Materials Cycles in Architecture (BioMat) y The Institute for computational design and construction, así como (ITKE) Institute of Building Structures and Structural Design y The Department of Biobased Materials and Materials Cycles in Architecture (BioMat) pertenecientes a la Universidad Técnica de Stuttgart, gestaron un movimiento robo-bio arquitectónico a través de pabellones efímeros. Esta metodología emergente, impactaría el entorno construido global, con sus subversivos sistemas de diseño computacional, dejando atrás la virtualización proyectual propia de inicios de siglo XXI, redefiniendo la arquitectura computacional con un nuevo *corpus*.

Las técnicas constructivas derivadas de esta metodología han acarreado críticas extrapoladas, sin embargo:

Lo inquietante de estas y otras críticas no es su desaprobación de un estilo o enfoque en particular, sino más bien su censura uniforme de la innovación arquitectónica: la aspiración de resolver desafíos, mejorar modelos antiguos o simplemente evadir la obsolescencia. La arquitectura debe innovar para crecer y mantener su relevancia y vigencia a raíz del cambio tecnológico, cultural y ambiental. Tal innovación empuja los límites de la construcción, lo que resulta en

formas y aplicaciones de materiales no anticipadas, pero este resultado difícilmente debe considerarse una afrenta.⁸⁴

Una de las principales metas de ICD/ITKE es indagar en los procesos computacionales arquitectónicos, combinando campos multidisciplinares mediante estrategias de Agent-Based Modeling ABM, - Metodología computacional para el diseño, simulación, optimización y toma de decisiones que se utiliza en una variedad de campos, incluida la robótica. - Tangent Plane Intersection (TPI), - técnica para buscar ángulos de intersección entre componentes individuales planos que en conjunto forman una superficie curvada. - softwares como Rhino y sus *plug ins* y la robotización de los sistemas constructivos: “El objetivo no es automatizarse completamente, sino una combinación de las fortalezas de la artesanía y la robótica.”⁸⁵

A diferencia de la arquitectura del S. XX generalmente concebida bajo una mirada de fuerte carácter tectónico, las técnicas edificatorias que aquí se analizarán son obras de una ligereza extraordinaria. Uno de los impulsores de estas robotécnicas constructivas es Achim Menges, quien afirma que “Nuevas formas de construcción requieren nuevas formas de diseño y fabricación.”⁸⁶ esta premisa aplicada a la

⁸⁴ Baline Brownell, MIND & MATTER. The Disruptive Nature of Architectural Innovation. “*ARCHITECT MAGAZINE*” (blog) 15 enero de 2015 https://www.architectmagazine.com/technology/the-disruptive-nature-of-architectural-innovation_o

⁸⁵ Stockholms Arkitektförening / The Stockholm Association of Architects, “Achim Menges: Rethinking Materiality through Computation in Architecture”. Abril 3, 2014: https://www.youtube.com/watch?v=PbgArau_4vI

⁸⁶ *Ibíd.*

proycción y fabricación con madera, la resurge como protagonista de las nuevas técnicas constructivas - mucho más atractiva en comparación con el concreto como contraparte menos ecológica -. Por tanto, esta metodología abre un nuevo rumbo, dando lugar a un movimiento arquitectónico nunca antes imaginado con proyectos de curvas audaces y lógicas constructivas que están cambiando el rumbo de nuestra profesión.

El desarrollo de este enfoque esta permeado por la comprensión holística del Echinoidea - erizo de mar - y Clypeasteroidea - dólar de arena. Una de sus particularidades es su segmentación modular en un entramado poligonal inscrito en una circunferencia, dado que: “En contraste con todos los demás equinoides, los dólares de arena dejaron la forma esférica de sus parientes taxonómicos y desarrollaron una forma plana con un contorno circular.”⁸⁷

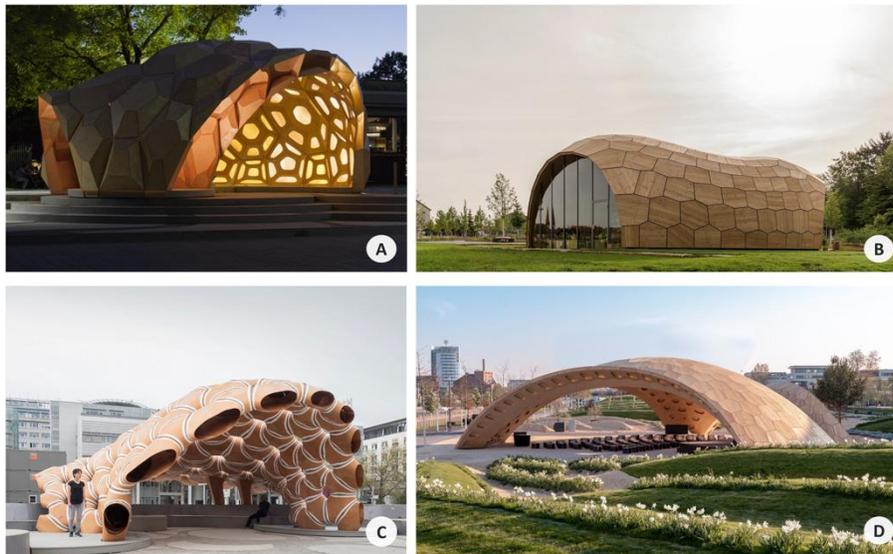


Fig. 21. Pabellones ICD/ITKE. 2011, 2014, 2015–16 y 2019.

⁸⁷ Perricone, Valentina “Constructional design of echinoid endoskeleton”, 1.

Puesto que la bio-morfología es una consecuencia directa del proceso evolutivo al que son sometidos estos organismos en función de su óptima adaptación a transformaciones constantes como cambios ambientales:

“El análisis biomimético de estas especies condujo a la investigación adicional de los siguientes principios, ya conocidos: (1) un esqueleto de doble capa, que se forma en algunas especies como el llamado crecimiento secundario y refuerza la prueba; (2) organización material jerárquica y diferenciación dentro del estereom de calcita, que se puede encontrar en muchas estructuras biológicas y (3) el principio de conectar segmentos con articulaciones de los dedos.”⁸⁸

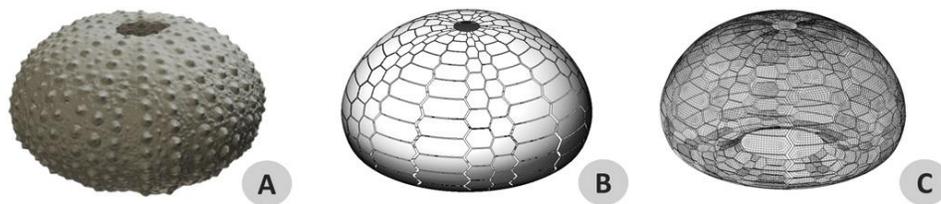


Fig. 22. Modelos virtuales de prueba de *Paracentrotus lividus*.

Resulta imprescindible integrar la capacidad performativa, estructural y material de la madera laminada, así como las características mecánicas del erizo de mar al diseño arquitectónico a través de un sistema modular de poliedros, celdas, paneles o casetones geoméricamente únicos y prefabricados robóticamente con un alto grado de adaptabilidad y rendimiento estructural.

⁸⁸ Simon Bechert, “Textile Fabrication Techniques for Timber Shells. Elastic Bending of Custom-Laminated Veneer for Segmented Shell Construction Systems”, *Advances in Architectural Geometry* (2016): 157, doi: 10.3218/3778-4_12

Gracias a un barrido SEM (microscopía electrónica) se logró detectar que el caparazón del erizo de mar está constituido por un sistema modular de placas poligonales resistentes al cizallamiento de fuerzas que actúan a través de los bordes. Se conectan por proyecciones de stereom, un material de carbonato de calcio que forma los esqueletos internos que se encuentran en todos los equinodermos. - a juntas irregulares y dentadas de calcita - que son el equivalente natural de las articulaciones de los dedos en el hombre. En virtud que las placas de calcita de algunas especies de erizo se conectan a través de elementos fibrosos que poseen la capacidad natural de engranaje perfecto.

El **sistema conectivo** utilizado en estas membranas es generalmente dentado, *finger joints*, posibilita cubrir claros importantes, además de juntas sin sujetadores adicionales, al mismo tiempo que evita los efectos de deformación, propios de la hinchazón o encojecimiento de la madera.

Flexión activa: Fabricación textil para membranas de madera

El advenimiento de las nuevas tecnologías de fabricación y construcción siempre ha sido un catalizador para la innovación del diseño y el próximo cambio de paradigma latente facilitado por la introducción de sistemas de producción ciberfísicos no será la excepción...estas tecnologías emergentes no solo desafían nuestra comprensión de cómo se construyen los edificios, sino más importante, cómo pensamos al respecto.⁸⁹

En la técnica de generación de superficies libres, dado la enorme variedad de curvas y sus infinitas combinaciones, las posibilidades morfológicas se limitan a la capacidad creativa del diseñador. Los beneficios respecto al comportamiento estructural permiten abarcar grandes distancias con poco uso de material. Este lenguaje estructural, generalmente de doble curvatura, ampliamente utilizadas en la arquitectura contemporánea se denomina como geometrías complejas. La generación de formas escultóricas, superficies emergentes o generativas está vinculada con el desarrollo tecnológico de los sistemas constructivos.

Uno de estos mecanismos para generar tales superficies se denomina flexión activa, una autoformación mecánica de elementos de madera, la cual ampara un caudal de oportunidades para trabajar con este sistema estructural pretensado que prescinde de encofrados y andamios: “La desventaja de los elementos doblados elásticamente es la tensión inicial causada por la flexión. Cuanto mayor sea la

⁸⁹ Achim Menges, “The New Cyber- Physical Making in Architecture”. *Architectural Design* 85, Issue 5 (2015): 28, <https://eds-p-ebSCOhost-com.pbidi.unam.mx:2443/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=2&sid=6a717aa7-95a7-40cd-8a28-c16f35bbb104%40redis>

tensión inicial, menor será la reserva de tensión bajo cargas externas. Por lo tanto, la tensión inicial debe ser lo más baja posible.”⁹⁰

La madera como material anisotrópico y heterogéneo, - contrario a materiales homogéneos e isotrópicos con propiedades similares en todas las direcciones como el acero o el vidrio - se encuentra sujeta a irregularidades naturales y se caracteriza por una deformación relativamente alta en el momento de la falla, lo que significa una elevada capacidad de carga con una rigidez relativamente baja. Sus atributos estructurales tienen la potestad de desembocar en propiedades plásticas excepcionales, dando cuenta del potencial latente para aplicarse en prototipos arquitectónicos.

Dentro de la industria de la construcción existe una amplia gama de sistemas constructivos de madera, en el caso particular de las membranas de madera segmentada contrachapada se han consolidado de manera muy reciente dos técnicas edificatorias: sistema poligonal y membranas semiesféricas. Esta última plantea el uso de la deformación elástica de perfiles rectos de un determinado material para conformar una superficie de doble curvatura. En estas membranas, la flexión se utiliza como proceso de autoformación, pese a ello, el término se refiere a un comportamiento físico más que a una tipología estructural específica.

⁹⁰ Christoph Gengnagel, Holger Alpermann y Elisa Lafuente Hernández, “Active Bending in Hybrid Structures”, Conference: *FORM – RULE / RULE – FORM* (2013): 3, https://www.researchgate.net/publication/264777082_Active_Bending_in_Hybrid_Structures

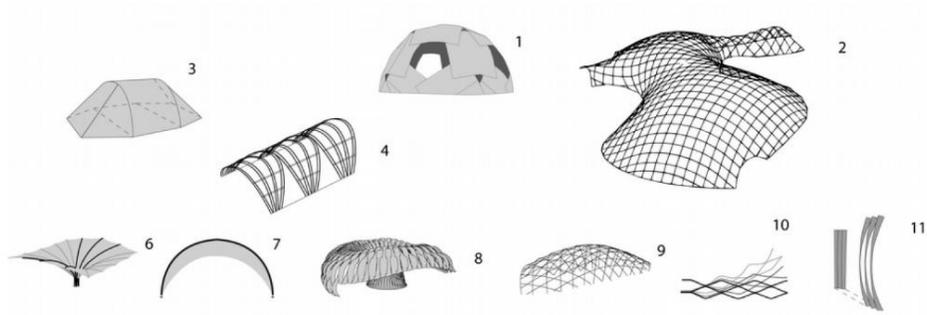


Figure 1. Examples of actively bent structures: arches, surface- and gridshells, membranes with elastically bent battens, bent structural components with membranes as a restraining system, and various types of adaptive and elastic kinetic structures. (1 plywood dome, 1957 2 expedition tents 1970's, 3 Multihalle Mannheim 1974, 4 Hooke Park Workshop 1990, 6 Marrakech Umbrella 2011, 7 membranes restrained elements 1999-2012, 8 Research Pavilion ICD/ITKE 2002, 9 Gridshell 2011, 10 Hybgrid, 2002, 11 Flectofin® project 2012)

Fig. 23. Estructuras a flexión activa

Los límites estructurales o capacidad de rendimiento de la flexión activa se encuentran en el rango en el cual, aplicando fuerzas externas, no se produzcan deformaciones materiales irreversibles:

...la capacidad de rendimiento es la calidad de los sistemas de materiales que funcionan a través de la deformación, o que se deforman visiblemente para autoorganizarse y resistir nuevas fuerzas externas (cargas, por ejemplo). Todos los materiales se deforman bajo tensión, y tales deformaciones pueden y a menudo deben calcularse cuidadosamente, pero en la ingeniería clásica la nueva configuración visual de las estructuras después de una deformación elástica (reversible) rara vez se tiene en cuenta para fines de diseño.⁹¹

El investigador Julian Lienhard la describe como: “la instrumentalización de la deformación elástica para conformar estructuras a partir de elementos lineares o planos y aportarles rigidez

⁹¹ Michael Ulrich Hensel, *Morphogenesis and Emergence*, (Nueva Jersey: Wiley (2012):158.

mediante la pretensión.”⁹² La metodología de diseño y fabricación resulta indisoluble, está ligada intrínsecamente ya que los investigadores pueden anexar determinados parámetros desde las primeras etapas del proceso de diseño simulando fuerzas, desempeño estructural y comportamiento del material, sus procesos de deformación y el posible espacio de diseño del sistema a desarrollar; con ello se logra obtener los conocimientos necesarios de sus propiedades mecánicas y enfocar estos procedimientos hacia soluciones a posibles problemas y con ello optimizar su rendimiento.

Esta técnica abastece un espectro enorme de experimentación científica que sobrepasa el ensayo y error. Su aportación más notable dentro de la transformación arquitectónica reside en el desarrollo de sistemas estructurales con intrincadas morfologías las cuales utilizan un mínimo de material respecto al claro que cubren. Julian Lienhard la clasifica de la siguiente manera:

Enfoque basado en el comportamiento, la flexión se usa inicialmente intuitivamente; la geometría, la estructura y el comportamiento del sistema se estudia empíricamente. Las limitaciones materiales son probadas físicamente.

Enfoque basado en la geometría, la geometría del sistema es predefinida basado en geometría analítica o experimental, métodos de búsqueda de forma, los cuales se utilizan como un control.

Enfoque integral, la deformación por flexión elástica es analizada a través de la búsqueda de formas numéricas, lo que permite una

92 Julian Lienhard y Jan Knippers, “Considerations on the Scaling of Bending-Active Structures”. *International Journal of Space Structures* 28 (2013):137, doi:10.1260/0266-3511.28.3-4.137

completa control de la geometría basada en el comportamiento del material.⁹³

Estos sistemas pueden dividirse en estructuras de rejilla (*gridshells*), estructuras de placa (*plate structures*) y estructuras de textil híbridas (*textile hybrid structures*).

El uso de la madera en esta técnica es mediante la laminación, es decir, listones de grosor inferior a 45 mm, encolados entre sí mediante un adhesivo, con la dirección de la fibra paralela, con lo cual es factible obtener piezas tan pequeñas o grandes como se requiera. Los listones ultradelgados de madera laminada hacen referencia a las fibras de los textiles por determinadas características como su flexibilidad y ligereza; sus patrones y comportamiento material resultan sumamente seductores para ahondar en ellos y tomarlos como punto de partida para este sistema constructivo. Lienhard describe esta técnica como un híbrido textil-madera debido a la interdependencia de forma y fuerza de las membranas textiles pretensadas mecánicamente.

⁹³ Julian Lienhard, Active Bending, A Review on Structures where Bending is used as a Self-Formation Process. *International Journal of Space Structures* 28 n.º 3&4 (2013):190, doi:10.1260/0266-3511.28.3-4.187

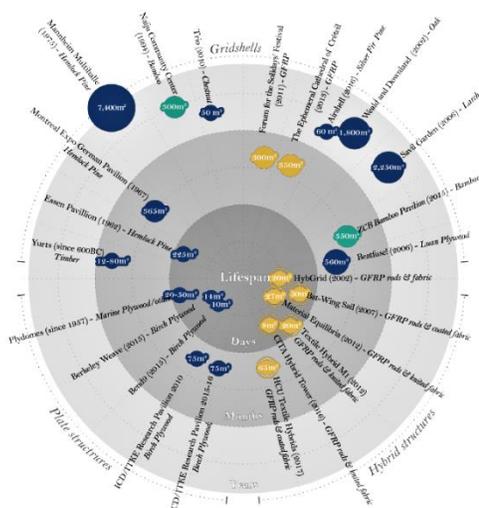


Figure 1: Synoptic map of the twenty-four bending-active structures selected and analysed by authors. Comparison/Relation between structural typology, life-span, materials and extension of each project.

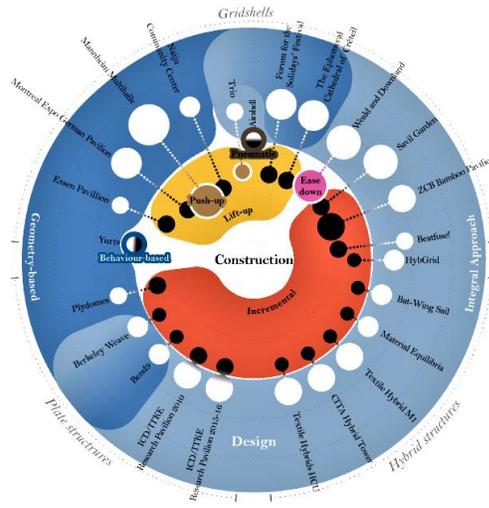


Figure 2: Synoptic classification of the selected structures analysed by the authors; the sorting follows the different design methods (outer ring) and construction methods (inner ring).

Fig. 24. Estructuras a flexión activa. Gráficas.

Valga decir entonces que, ¿el futuro de la arquitectura se encuentra en los edificios textiles como lo apuntó Gottfried Semper en El origen textil de la arquitectura? En dicho texto del S. XIX, Semper planteó una teoría en contrapunto con el clasicismo vitruviano en la cual reflexionó sobre los entrelazos o anudamientos, que dieron cabida a elementos constructivos. En el horizonte decimonónico de la teoría semperiana, el tejido o entrelazado de fibras naturales representan la verdadera esencia de la arquitectura.

Al umbral de las vanguardias arquitectónicas de esta última década, determinadas obras han permitido reevaluar las analogías textiles de los ecos semperianos para reconsiderar la fertilidad de aquellas reflexiones sobre el origen textil del muro y las envolventes. La madera a diferencia de los textiles posee capacidad de carga, así entonces su uso constructivo estriba en su facultad estructural, resulta contrastante la aplicación de principios textiles en la fabricación robotizada con madera, dado que tradicionalmente asociamos a la

madera con elementos estructurales rígidos mientras que los textiles son flexibles y elásticos.

Para un uso extensivo de la flexión activa en membranas ultraligeras es necesario garantizar la suficiente capacidad de carga, incluyendo una considerable tensión de flexión autoequilibrante, por ello se deben elegir materiales de alta deformación como madera blanda, bambú o caña. Pese a que las estructuras a flexión activa habían sido poco exploradas fuera de la arquitectura vernácula, debido entre otras circunstancias a la poca capacidad para predecir con precisión las deformaciones, los alcances de su rendimiento estructural y las herramientas para diseñar con elementos geoméricamente inestables, la incorporación de herramientas robótico-computacionales - las cuales calculan, modelan, diseñan, simulan y fabrican - han propiciado un resurgimiento de esta singular técnica.

Estos sistemas enfrentan el reto de conectar la metodología de diseño y fabricación tradicional de los principios textiles y llevarlos hacia estructuras arquitectónicas - más allá de las tradicionales metáforas de los tejidos y de la arquitectura vernácula - mediante la modulación, panelización o discretización; es decir que el conjunto arquitectónico debe segmentarse o teselarse mediante patrones con el principio fundamental de la mayor similitud en tanto medidas y deformaciones. La institución de módulos básicos linealmente, forman secuencias constructivas las cuales desembocan en una estructura sólida, ultraligera y autoportante. Debido a la interconexión de sus elementos modulares resulta poco probable que ante el fallo de alguno de ellos el proyecto colapse: “Al unir los segmentos a una superficie de carcasa de doble curvatura, se logra la acción de la membrana

como comportamiento de carga gobernante y hace que el sistema sea estructuralmente muy eficiente.”⁹⁴

Este principio es utilizado para desarrollar sistemas curvos que encuentren sus cualidades estructurales en la geometría, valga decir que la morfología es el resultado del comportamiento estructural material. Sin embargo, este planteamiento presenta la desventaja que los módulos permanecen como elementos independientes entre sí, por ello carecen de continuidad estructural en la dirección transversal. Para corregir tal situación, la adición de un elemento perpendicular a éstos los dotará de cohesión y mejores capacidades estructurales.

La técnica *bending active structures* o estructuras a flexión activa impulsa nuevos horizontes constructivos debido a sus cualidades físicas para actuar de manera activa mediante la deformación de sus elementos materiales. Estos atributos estructurales son aprovechados para desarrollar estructuras de carga primarias. Ahondar en el amplio espectro de conceptos teóricos sobre estructuras ligeras es fundamental, pero para que estos supuestos traspasen el estado del arte, implica necesariamente el desarrollo de prototipos que verifiquen físicamente el comportamiento material, estructural y corroboren que la morfología resultante de la flexión activa es apta para estructuras de carga de primer orden, para demostrar sus capacidades, aptitudes y alcances.

⁹⁴ Bending-Active Segmented Shells. ITECH M.Sc. 2018

<https://www.itke.uni-stuttgart.de/teaching/past-student-projects/bending-active-segmented-shells/>

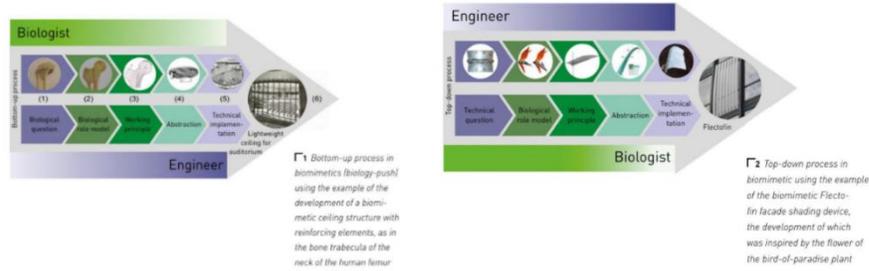


Fig.25. Metodologías de investigación: Abajo - arriba. Arriba – abajo.

Los sistemas activos de flexión en virtud de sus características morfológicas, de comportamiento material y estructural conllevan una metodología integral de abajo hacia arriba, es decir que el diseño, análisis, visualización y fabricación son estudiadas y planificadas previamente a la definición formal: “El enfoque de arriba hacia abajo comienza con el análisis de problemas técnicos complejos a la persecución en naturaleza de los modelos biológicos que ofrecen soluciones novedosas. En la literatura, este enfoque también se conoce como: impulsado por problemas, basado en problemas, desafío a la biología, tirón tecnológico y biomimética por analogía.”⁹⁵

Para la simulación de estructuras a flexión activa, se han desarrollado una variedad de herramientas numéricas que tienen en cuenta, tanto el comportamiento material como las deformaciones producidas durante el proceso de plegado. De este modo se ha creado un algoritmo *formfinding* que además calcula la disposición de los arcos según su curvatura:

⁹⁵ Valentina Perricone, “Constructional design of echinoid endoskeleton: main structural components and their potential for biomimetic applications”. *Bioinspiration & Biomimetics* 16 n.º1 (2020): 12, doi: 10.1088/1748-3190/abb86b

Los procesos de búsqueda de forma para membranas pueden ser modelado y simulado físicamente a través de **relajación dinámica digital**. Este último involucra una malla digital que se instala en un estado de equilibrio a través de cálculos iterativos basados en la elasticidad específica y la composición del material de la membrana- isotrópico en el caso de las láminas, anisotrópico en el caso de los tejidos -combinado con la designación de puntos límite y fuerzas relacionadas. Las mismas aplicaciones de software también pueden generar los patrones de corte asociados si la membrana estar construido de material relativamente no elástico.⁹⁶

⁹⁶ Achim Menges, “Polymorphism”. *Architectural Design*, Vol. 76 Issue 2, (2006): 79, <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1002/ad.243>

Toroide de arcos restringidos de madera laminada a flexión activa

En un afán por difundir los horizontes teórico/metodológicos y aventajar el rol de la computadora como máquina de representación, los institutos ICD/ITKE de la Universidad Técnica de Stuttgart, instituyeron a la computación como una herramienta generativa de diseño la cual integra procesos virtuales de desarrollo de formas y su transcripción física de manera robotizada. Con ello en mente, desarrollaron un procedimiento que cohesiona el diseño, análisis estructural, la simulación, visualización y fabricación de proyectos arquitectónicos prototípicos a escala humana. Mediante este sistema se desplegó una técnica constructiva de sustracción, la cual favorece la fabricación de estructuras ultraligeras a partir de la deformación de materiales inicialmente planos, al reorientar su dirección para finalmente conseguir una cubierta autoportante toroidal.

Se optó por una **membrana de arcos restringidos**, “son estructuras de arco, donde un arco de dos bisagras está restringido por una membrana dentro del arco. Los arcos de contención de membrana se pueden utilizar para construcciones móviles permanentes, temporales o, en particular, de despliegue rápido.”⁹⁷

Debido a las considerables dificultades técnicas para sincronizar de manera óptima, fuerza, forma y rendimiento, esta metodología morfogenética comprende los sistemas materiales como impulsores en los procesos de diseño. Con el análisis de la composición del

⁹⁷ Christoph Gengnagel, Holger Alpermann y Elisa Lafuente Hernández, Active Bending in Hybrid Structures, *Conference: FORM – RULE / RULE – FORM* (2013), 7.

material a nivel macro y microescala se visualizó a la madera como un material que favorece una amplia gama de formalidades:

“De esta manera las propiedades, el comportamiento del material y las características de materialización relacionadas no se entienden como restricciones que simplemente necesitan ser acomodadas, sino más bien como la fuente misma de una exploración en el proceso de diseño computacional.”⁹⁸



Fig. 26. Pabellón ICD / ITKE 2010

Asimismo, uno de sus principios es la escalabilidad de prototipos hacia modelos arquitectónicos sin perder sus propiedades estructurales ni presentar desestabilización por compresión, a la vez que se mantienen sus elementos con las flexiones tal cual fueron calculados.

El toroide está constituido por la cadencia uniforme de listones planos de madera flexionada con juntas en sus intersecciones las cuales se distribuyen a lo largo de su morfología formando un sistema estructural de arcos absolutamente estables. La unión radial de estos segmentos curvos como módulos repetitivos - que trabajan a flexión

⁹⁸ Achim Menges, Material resourcefulness: Activating Material Information in Computational Design. *Architectural Design* 82 (2012): 35, doi: 10.1002/ad.1377

y compresión - crean un sistema tridimensional complejo, rígido y autoportante, estable per se y exento de estructuras auxiliares para mantener su estabilidad:

Un arco de dos bisagras formado a partir de un elemento recto por flexión elástica obtendrá una "forma de flexión", caracterizada por una distribución de tensión no uniforme. Las tensiones máximas causadas por la curvatura máxima aparecen en el medio del arco. En los apoyos, la curvatura y los momentos flectores son cero. Esta distribución desigual se puede equilibrar si se utiliza la membrana para dar forma al arco en una geometría circular. Como la membrana y el cable de borde están pretensados, el arco también está pretensado independientemente del uso de elementos doblados o curvos.⁹⁹

Para resolver el problema del pandeo se eligieron placas en un punto medio de delgadez que acogieran deformaciones importantes, pero lo suficientemente gruesas para elevar la rigidez de la estructura.

Integración de la generación de formas computacionales y el comportamiento físico

Mientras que en el mundo físico la forma material siempre está inseparablemente conectada a fuerzas externas, en los procesos virtuales de diseño computacional la forma y la fuerza generalmente se tratan como entidades separadas, ya que se dividen en procesos de generación de formas geométricas y simulación posterior basada en propiedades específicas del material "...aquí, la generación computacional de la forma es impulsada e

⁹⁹ Christoph Gengnagel, Holger Alpermann, Elisa Lafuente Hernández, "Active Bending in Hybrid Structures", *FORM – RULE / RULE – FORM* (2013): 7.

informada directamente por el comportamiento físico y las características del material.”¹⁰⁰

Se desplegó una simulación elástica de los 80 listones de madera contrachapada de abedul de 6.5 mm utilizando el software FEM para calcular el comportamiento del material bajo la geometría y condiciones físicas, teniendo en cuenta también todas las actuaciones fuerzas y limitaciones materiales. Ello concedió la visualización de las tensiones materiales en el proceso de *form finding*, refiriendo la más acertada y completa descripción mecánica del comportamiento de los elementos de la membrana.

SOFiSTiK, realizó una serie de simulaciones de flexión para calcular las deformaciones y tensiones de la estructura bajo grandes deformaciones y con ello predecir el estado de equilibrio. Se consideraron fuerzas externas y tensiones internas del material. Las deformaciones de los módulos fueron calculadas empleando un esquema de relajación dinámica “que requiere la introducción de valores agrupados de masa y coeficientes de amortiguamiento en el modelo computacional.

Los modelos resultantes informan sobre el abanico morfológico disponible dentro de los niveles de tensión predefinidos, la capacidad material, así como las deformaciones y distribuciones de tensiones bajo cargas externas de viento. Es por tal que considerar ambos softwares simultáneamente es particularmente importante ya que la deformación geométrica de una estructura depende

¹⁰⁰ Achim Menges, “achimmenges.net” ICD/ITKE Research Pavilion 2010, acceso el 06 de febrero 2021, <http://www.achimmenges.net/?p=4443>

significativamente del equilibrio de fuerzas que se ejercen sobre él. Así se originó un modelo numérico computacional paramétrico:

...que integró el conocimiento derivado de experimentos físicos de búsqueda de formas en una salida geométrica en forma de polilínea. Además de una secuencia de comandos de varias subrutinas utilizaron las polilíneas de los modelos paramétricos como una entrada para crear el modelo geométrico en Nurbs. Posteriormente, existieron subrutinas individuales, dentro del modelo de información, para todos los aspectos del diseño del pabellón: Desde la creación de un modelo tridimensional NURBS-Surface (modelo geométrico) para visualización y análisis solar para generar todos detalles relevantes y la geometría de las tiras 2D desenrolladas para simulación FEM.¹⁰¹

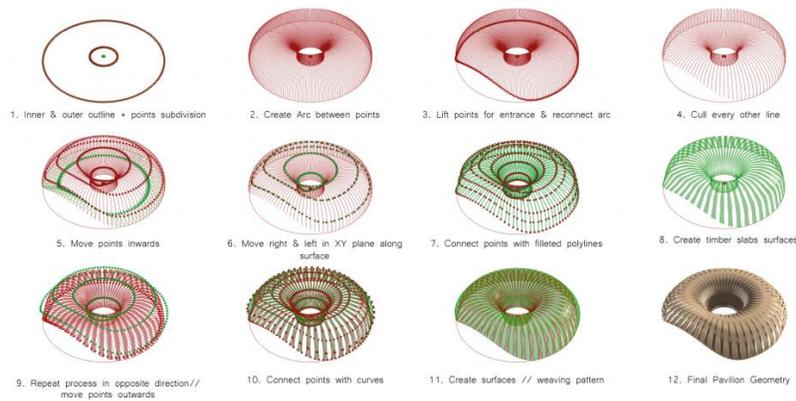


Fig. 27. Modelado de circunferencia paramétrica

Finalmente, se discretizó el modelo mediante un conjunto de nube de puntos, basado en las dimensiones del prototipo construido, permitiendo comparar la exactitud y desviación del modelo virtual y su traducción física. En virtud de ello se demostró que ambos modelos se corresponden a sí mismos, dejando atrás la añoranza

¹⁰¹ Ibid.

virtual para dar pie a una realidad material viable para propuestas arquitectónicas.

Discretización y optimización morfológica mediante asociación paramétrica

En la membrana se enlazaron 40 arcos en distribución radial, conectándose a intervalos de longitud diferencial para formar regiones tensas y dobladas elásticamente a lo largo de los listones de madera que se bloquean en su posición por las franjas adyacentes: “La fuerza que se almacena localmente en cada región doblada del listón y mantenida por la región tensada correspondiente de la tira vecina, aumenta enormemente la capacidad estructural del sistema.”¹⁰²

Esta metodología facilitó la fabricación de 500 piezas geométricas únicas con 3 tipos de detalles:

1. Junta resistente al corte para conectar tiras adyacentes.
2. Junta de rompecabezas de tensión para conectar segmentos de tira.
3. Unión entre la tira elástica y la base estructural.

El proceso de ensamblaje excluye mano de obra especializada, ya que el material en sí mismo determina la forma final de la estructura de filigrana hiperligera debido a su buen comportamiento estructural.

La configuración de fabricación del toroide de 400 kg de peso se logró mediante un brazo robótico industrial de seis ejes, se flexionaron manualmente 80 listones de madera contrachapados, los cuales consistieron en 6 o 7 segmentos y se combinaron con su franja

¹⁰² Ibid, 74.

vecina para formar arcos autoportantes, se conectaron alternando regiones elásticamente dobladas y tensas a lo largo de su longitud para evitar concentraciones de tensión local, así como la adyacencia de puntos débiles dentro del sistema general.

Los **logros técnico-constructivos** en su solución estructural le significo a este pabellón ser una obra sumamente ligera, económica y viable en términos de fabricación. Su idealización partió como base de una serie de cuestionamientos alejados totalmente de la idea de cubrir una determinada área, sino más bien orientados a trabajar con la madera laminada a flexión y su autonomía estructural. Esta armadura que recupera en cierta medida el trabajo de carpintería artesanal de Otto, con una morfología parametrizada, es al mismo tiempo epidermis y estructura potencialmente resistente, flexible y semi traslúcida. Fue erigida a través de un enfoque modular que exhibe las potencialidades poco exploradas que pueden alcanzar las estructuras basadas en el concepto de deformación a flexión de la madera.

El espacio circular se recorre interminablemente, dado que su secuencia espacial, sus tramas cóncavas y convexas, así como sus matices lumínicos naturales o artificiales no admiten la precepción de un espacio total. Se codifica en un perfil aparentemente sencillo, pero con una calidad estética icónica y marcadamente diferente del resto de las estructuras contemporáneas efímeras de madera.

Esta metodología resultó ser el detonante para una serie de proyectos que, en virtud del proceso de diseño integrativo, contribuyó a desvelar el enorme abanico de posibilidades que posee la madera para desarrollar con ella estructuras con facultades arquitectónicas eficientes. Se demostró que la simulación numérica tanto del marco

estructural como del rendimiento del material, pueden conducir a nuevas posibilidades arquitectónicas y estructurales basadas en las propiedades elásticas de la madera.

El diseño de la estructura de doble curvatura con una geometría fluida hiper orgánica, trasciende los gustos, modas y preferencias de proyectistas y constructores; es el resultante de una variedad de observaciones previas a su fabricación, de los análisis materiales, estructurales, así como sus condicionantes restrictivas. La conexión entre forma/estructura resultan inherentes y aportan un edificio de operación conjunta entre humanos, ciencias computacionales y brazos robóticos para la materialización física de un anhelado futuro que ha llegado.

La calidad plástica propia e inigualable de esta membrana de pronunciada curvatura potencializa la idea de unicidad, resuelta efectivamente en cuanto a sus cualidades morfológico-estructurales, materiales y su solución plástica. La estructura liberada de un sueño utópico computacional ofrece un híbrido de espacio interior exterior con un repertorio de principios geométricos clave para su morfología. Los anillos volumétricos suavemente entrelazados entretejen aberturas hacia el cielo, es como si se tratase de observar la bóveda celeste desde su réplica en miniatura. El espacio graduado gracias a las ramificaciones de sus arcos determina una fluidez formal con su sistema estriado de franjas de doble curvatura, nacientes de sus particulares uniones secuenciales que ensambladas determinan una estructura autoportante icónica.

Reimaginar los procesos constructivos en combinación de materiales tradicionales aunado al desarrollo tecnológico que actúa como un catalizador arquitectónico prolifera a medida que se excava terreno

en las facultades, efectos y repercusiones que las ciencias computacionales tienen en la arquitectura. Resulta irrefutable la fatiga que sufren los materiales, en el caso de los componentes modulares de madera a flexión se sabe que pierden cerca de la mitad de sus tensiones en el primer año después de la construcción debido a la relajación de tensiones. Aunque cabe decir que, los geólogos involucrados en el proyecto realizaron escaneos, lo cual confirmó una serie de datos estructurales que documentan cambios geométricos resultantes de la relajación y/o fatiga, así como el deslizamiento de los listones. Esta documentación será útil para predecir el comportamiento material y estructural del pabellón en un plazo a largo tiempo, además de poder recalibrar el toroide por medio de FEM cuando se presente la fatiga material.

Adolece de la estrategia metodológica basada en la transmisión de principios biológicos al quehacer arquitectónico que gozarán los espacios prototípicos de estos institutos a partir del 2011. Pese a ello, incorpora la innovación en tratamiento de materiales, diseño de sistemas constructivos, así como alto performance y ligereza, los cuales son términos que caracterizan la filosofía de ICD/ITKE.

Casetones textiles de madera a flexión elástica



Fig. 28. Pabellón ICD-ITKE 2015-16

Las fibras flexibles de celulosa que conforman a la madera son tolerantes a la deformación, pese a ello, son pocos los casos en que el material laminado se deforma flexiblemente como un textil mediante procesos físicos mecánicos. Una de las hipótesis en esta técnica es que la madera como material compuesto de fibras naturales “...debería considerarse y procesarse más como un material textil anisotrópico que como un material rígido e isotrópico como el acero o el hormigón, o la madera contrachapada pegada.”¹⁰³

La asimilación de factores de índole estructural, de resistencia del material, de posibilidades morfo-espaciales, así como la conjugación de la tecnología y los principios textiles aplicados a la arquitectura prototípica generan casquetes semiesféricos de madera laminada utilizada como un textil a través de tiras o listones. Estos domos se caracterizan por su ligereza y resistencia al mismo tiempo, es por ello que se presenta una variación de estos sistemas modulares mediante casetones textiles de madera a flexión elástica.

¹⁰³ Daniel Sontag, Simon Bechert y Jan Knippers, Biomimetic timber shells made of bending-active segments. *International Journal of Space Structures*. (2017): 149, doi: 10.1177/0266351117746266

El comportamiento de la deformación de la madera a flexión activa utilizada a nivel de segmento genera un sistema constructivo el cual fue evaluado a través del **Pabellón ICD-ITKE 2015-16**. La membrana está conformada por 151 segmentos de madera de haya laminada, tiene entre 0,5 y 1,5 metros de diámetro y un espesor material entre 3 y 6 mm.

Esta técnica tiene por objetivos fundamentales:

1. Desarrollar un sistema modular de paneles textiles mediante listones de madera flexionados.
2. Investigar enfoques alternativos sobre planarización para segmentar las superficies de la membrana teniendo en cuenta la elasticidad a la flexión de la madera.
3. Generar un sistema conectivo (juntas integradas) de costura robótica para la fabricación de componentes de construcción hechos de segmentos de madera ultraligera y explotar la elasticidad del material.

La estrategia de diseño computacional integral se exploró mediante NURBS. El diseño se origina en los soportes, que representa los puntos centrales del segmento e implementa los radios de crecimiento de los segmentos a lo largo del tiempo. El resultado es una disposición uniformemente espaciada de puntos de entrada con círculos tangentes que indican el creciente radio de separación entre segmento.

La rigidez de los paneles activos a flexión deformados mecánicamente se logró mediante la laminación de tiras de madera contrachapa de haya de 3 mm reforzadas localmente. Ello conforma un sistema equilibrado, incluso previo al proceso de ensamblaje de

las tiras de madera, que una vez montadas adquieren una doble curvatura.

La conexión de las placas de calcita de algunas especies de erizo se logra a través de elementos fibrosos, además de las articulaciones de los dedos “y se puede establecer la hipótesis que esta conexión de múltiples materiales juega un papel importante en mantener la integridad de la cáscara del erizo durante el crecimiento y la exposición a fuerzas externas.”¹⁰⁴

Discretización y optimización morfológica mediante asociación paramétrica

La **simulación numérica paramétrica** permite además de conocer la distribución del material y manipular determinadas condiciones, predecir una morfología final. Las membranas de madera a la flexión activa de doble curvatura se teselan para posibilitar su fragmentación en elementos individuales y con ello lograr propiedades mecánicas extraordinarias, sin embargo, una serie de investigaciones sobre el material, su resistencia a la flexión y su comportamiento estructural son requisitos previos a la construcción, indispensables para establecer modelos algorítmicos.

El proceso de deformación que crea una tensión específica, se denomina estrés inicial y puede calcularse mediante simulación computacional, ello proporciona información en términos de posible desempeño estructural para la membrana.

¹⁰⁴ University of Stuttgart, *2016 ICD Research Buildings / PrototypesICD/ITKE Research Pavilion 2015-16*, <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/icditke-research-pavilion-2015-16/>

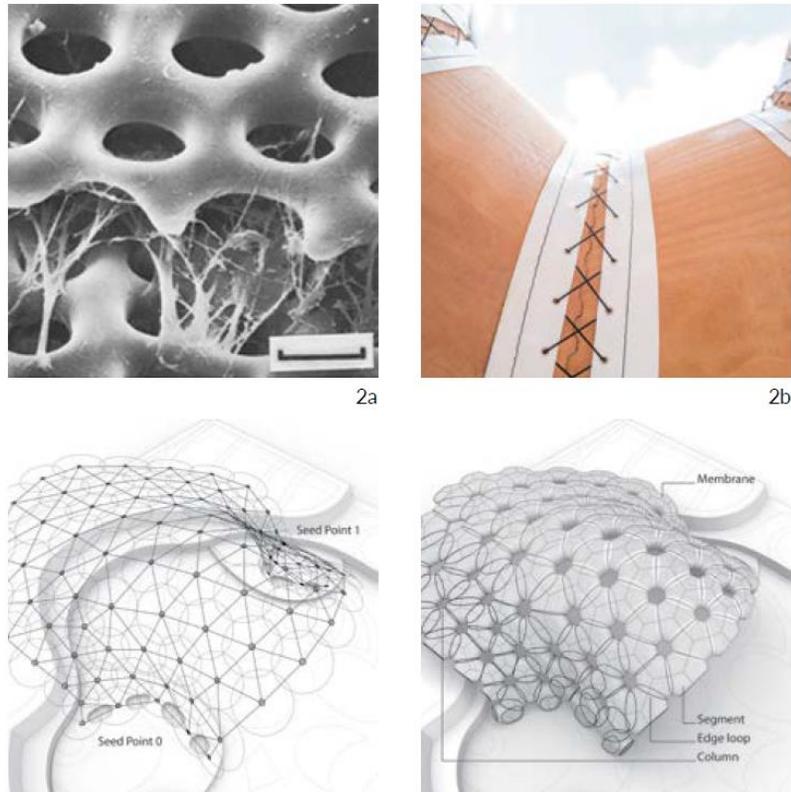


Fig. 29. Pabellón ICD/ITKE 2015-16

Los listones madera se laminan de tal modo que la dirección de la fibra y su espesor se corresponde con la rigidez diferenciada necesaria para formar piezas con radios variables y aunado al doblez elástico de éstos, se logró instrumentalizar la anisotropía de la madera, es decir se adaptó a los requerimientos estructurales del proyecto a través de un proceso de crecimiento de segmentos de radios, desde luego, respetando determinadas restricciones:

El principio de agregar y aumentar segmentos... se puede transferir a través de un enfoque de **empaquetamiento de círculo paramétrico**. Las reglas geométricas de distribuir placas en una configuración compacta se parecen a la atracción y repulsión entre círculos en una superficie. Si bien estos círculos representan segmentos, sus radios determinan el tamaño de los segmentos y los mantienen a distancia

de sus vecinos. Una vez sembradas en las áreas de entrada definidas por el usuario, crecen hasta que la superficie se llena por completo...Este proceso de crecimiento conduce a un diseño segmentado similar a las placas esqueléticas del erizo de mar, ya que los segmentos que están más alejados de los puntos de partida suelen ser más grandes.¹⁰⁵

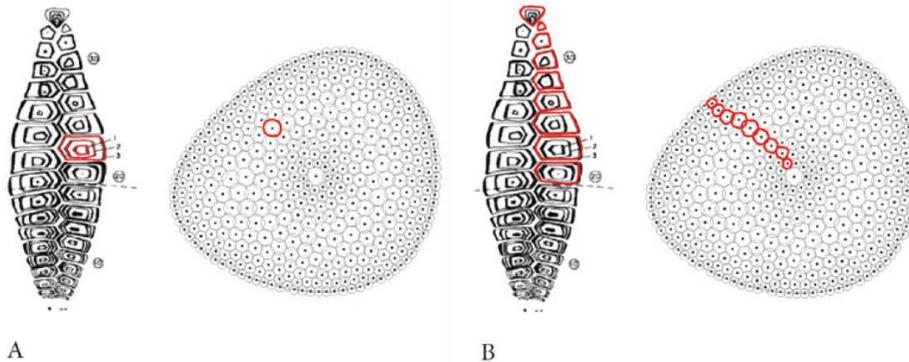


Figure 9a. Diagrammatic representation of plate accretion (left). A row of calcite plates is shown that grow in size while moving towards the middle. The principle of growth is abstracted in the computational design tool (right).

Figure 9b. The principle of plate addition (right) starting from the top (ambulacral plates) is also transferred to the computational design tool (right).

Fig. 30. Principios de crecimiento en los dólares de arena.

Durante la **configuración de fabricación** se utilizó una conexión directa al modelo computacional, en el cual los listones se segmentaron en áreas de rigidez discretizada de 100 mm de ancho, con el fin de garantizar un proceso de laminación preciso y eficiente, las instrucciones se transfieren al material según el radio requerido. El robot posicionó a cada tira en la máquina de coser industrial, posterior a ello, los listones se laminaron utilizando un proceso de corte CNC de 3 ejes. Las articulaciones de los dedos a lo largo de los

¹⁰⁵ Daniel Sonntag, Simon Bechert y Jan Knippers, “Biomimetic timber shells made of bending-active segments”. *International Journal of Space Structures* 32 no. 3-4 (2017): 166, doi: <https://doi.org/10.1177/0266351117746266>

bordes están conformadas para acomodar los ángulos variables entre segmentos. Como estos varían de coplanares a perpendiculares, las articulaciones de los dedos varían en ancho y largo. El robot ensambla y une las 3 tiras dobladas elásticamente mediante una máquina de coser industrial.

Los listones de madera contrachapada "...se doblan alrededor de su eje longitudinal en orden para conectar en ambos extremos con juntas de regazo.

La metodología para lograr que la madera permitiera la penetración de la aguja sin deslaminarse, es debido a una membrana de poliéster cubierta de pvc a lo largo de los bordes articulados de los paneles, esto permite transferir continuamente las fuerzas de tensión entre segmentos. Experimentos físicos realizados a láminas de madera establecieron el límite inferior de curvatura que el laminado toleraría antes de fallar.

Cuando estos elementos prefabricados se logran montar, nace una estructura rígida doblemente curvada que consta de tiras de madera flexionadas las cuales forman paneles con un espesor máximo de 6 mm, que se unen mediante costura robótica. Dos robots cooperantes manejan la pieza de trabajo y la guían a través de una máquina de coser industrial estacionaria con una aguja con punta cubierta de nitrato de titanio, lo cual "ofrece una mayor dureza que las agujas estándar y una mejor protección contra el desgaste y los daños.

La membrana de 780 kg cubre un área de 125 m², está formada por 151 paneles prefabricados de madera flexionados coincidentes con la curvatura requerida. Las tiras de madera contrachapada se doblan hacia afuera de un segmento formando una columna. Por lo tanto, la estructura no se ve

obligada a terminar verticalmente en el suelo, sino que puede erigirse en voladizo horizontalmente mientras se apoya en esos segmentos verticales.

La naturaleza performativa de la superficie del pabellón esculpido acentúa las formas biónicas de la estructura. Se propone como una obra de dosel ondulante que refleja el movimiento a través de una serie de celdas con formas orgánicas intercomunicadas deliberadamente. Aunado a ello, la organización porosa que permite horadaciones entre los componentes individuales garantiza la iluminación y ventilación natural - controlada desde el proceso de simulación -.

Su cubierta cronoxila – estructura y envolvente a la vez - se compone de un cuerpo de madera sin distinciones entre cubierta exterior e interior o fachadas. Así este exoesqueleto o exoescultura cimenta todos los elementos en uno mismo, incluidas las columnas, que le hacen rozar el sistema constructivo de losa y columna. Esta técnica constructiva permite la producción de superficies de doble curvatura de madera contrachapada laminada y cosida mediante un efector. La estructura no solo funciona como un caparazón puro, sino que permite situaciones estructurales con momentos de flexión más altos a través de la introducción de columnas (soportes internos) como parte integral del sistema de construcción:

...el sistema permite una transición de un sistema de caparazón a un sistema de columna y losa. Esto ofrece posibilidades arquitectónicas completamente nuevas al expandir el catálogo de tipos estructurales y posiblemente constituye una de las principales contribuciones al campo. La síntesis de los muchos requisitos de diseño diferentes y a veces, conflictivos permite la exploración de un dominio específico del espacio de solución al que no sería accesible de otra manera.¹⁰⁶

¹⁰⁶ *Ibid.*

Como **logros técnico-constructivos** sobresale el uso de la costura robótica en paneles de madera laminada, ello demuestra que la arquitectura tiene la capacidad de desarrollar proyectos mediante procesos textiles a la vez que genera obras visualmente atractivas, pero también enormemente performativas. Pese a que en esta cubierta aún se trabajó con paneles de madera laminada, el proceso unificador entre cada celda considera un enfoque inédito respecto a las estructuras prototípicas anteriores.

A medida que se avanza constructivamente hacia membranas que cubren claros más significativos, uno de los requisitos primarios es encontrar técnicas de unión en concordancia con dichas estructuras, su material de fabricación, sus ángulos y demás características que puedan ser consideradas importantes, ya que el sistema conectivo puede interrumpir su continuidad estructural, en virtud de la pausa del encadenamiento de las fibras de celulosa en la madera. Las tradicionales uniones para madera no encajan en las láminas ultradelgadas de este material, ello ha generado investigaciones constructivas respecto a cómo deberían ser las conexiones de los paneles en los sistemas modulares, dado que las complejidades geométricas deben, por códigos de construcción, mantenerse en un determinado grosor material.

El comportamiento anisotrópico de la madera – poco deseable en la industria de la construcción – orilló a buscar reformas sobre su uso. La gran aportación en este pabellón es lograr la transformación mediante flexión de listones de madera planos en celdas polivalentes tridimensionales los cuales pueden ensamblarse bajo un método tan tradicional como el de la costura, aunque en este caso sea robótica.

Si bien, es poco factible la construcción de una tipología no efímera mediante esta técnica, se inauguró una gama de posibilidades conectivas hasta ahora inexploradas. Las celdas huecas unidas con un método de costura robotizada (mediante un hilo de aramida recubierto de poliéster, cuya densidad se ajusta a los requisitos estructurales) formando un conjunto arquitectónico es ya un hito en la historia de la arquitectura más allá de las formalidades, la estructura hiper ligera y de material sustentable, destaca primordialmente por su diseño comparable quizá con una diátomea u otro sistema biológico unicelular.

La costura robotizada brinda la oportunidad de superar los sistemas conectivos tradicionales de madera, como han sido los anclajes de metal. Para dicho procesos,. Además, proporciona una resistencia a la rotura y resistencia a la abrasión muy altas.

El caparazón de estereom de los erizos de mar considera variaciones de densidad en toda su superficie, ello es transferido a un modelo abstracto para lograr los requisitos estructurales de manera óptima.

Esta técnica se aleja de las réplicas biomiméticas superficiales y va más allá de agregar elementos naturales a la construcción, para posicionarse como visiones arquitectónicas biofílicas acercándose a la creación de una bio robo-arquitectura.

Homeostasis:

Sistema estructural de madera autoconformada a flexión activa



Fig. 31. Torre Urbach

¿De qué manera las propiedades intrínsecas de un material pueden utilizarse a propósito para generar una determinada morfología?,
¿Cómo aprovechar la capacidad de autoformación de un material en arquitectura?

La robótica como fuente productora de técnicas constructivas a través de un enfoque computacional, permite líneas de producción con una flexibilidad e inmediatez sin igual. El objetivo común era aumentar la precisión y la capacidad operativa en aras de procesos mecanizados, con ello se corre el riesgo de reducir las obras arquitectónicas a meros contenedores espaciales idénticos entre sí o por lo menos con características determinantes sumamente similares.

Las membranas de madera hasta ahora expuestas han superado los perfiles macizos rectos inscritos en la ortogonalidad, ello ha dado cabida a un nuevo germen de estructuras de madera geoméricamente complejas: una torre con formas torsionales y/o de doble curvatura, surgida a partir de elementos planos que logran su deformación mediante la flexión activa.

La referencia a determinados procesos de mecanización de elementos prefabricados por medio de brazos robóticos para el ensayo de sistemas edificatorios de madera a flexión activa se ha llevado a cabo hasta ahora a través de procesos sustractivos, aditivos y la combinación de ambos en los que mandatoriamente se requiere la aplicación de fuerza mecánica bruta. Si bien los métodos de doblar madera (flexión activa) en diferentes formas han existido durante siglos y se han convertido en procesos industriales reconocidos, todavía dependen principalmente de la coacción externa para el proceso de conformación.

En virtud del avance de la fabricación robótico computacional se ha logrado desarrollar una interacción entre el material y su técnica, así ha nacido el tercer proceso denominado de autoconformación o *self-shapping*. En estos sistemas, la forma se auto genera a partir de la programación del material para actuar mediante un estímulo externo, en este caso es la deshumidificación. Su desarrollo está basado en maximizar la atención en las capacidades intrínsecas de los materiales, dado que hasta ahora, en la búsqueda de formas cada vez más intrincadas y curvas, el centro de la atención había estado en el uso de herramientas tecnológicas.

El uso de madera laminada cruzada (CLT) en esta obra es debido a su:

“...elevada capacidad de carga biaxial y estabilidad dimensional. Además, proporciona un procesamiento y laminación más económicos en comparación con otros productos de placas de madera”.¹⁰⁷

¹⁰⁷ Lotte Aldinger, Simon Bechert, Dylan Wood, Jan Knippers y Achim

La fabricación de componentes de madera autoconformados a escala humana, surge mediante la flexión activa de segmentos planos, los cuales reaccionan ante un estímulo externo, es decir la materia informada es reemplazadora de los procesos de modelado mecánicos. En este sentido, la técnica aloja el concepto de homeostasis, una propiedad de los organismos para mantener sus condiciones internas estables ante cambios externos. La homeostasis ha sido investigada sobre todo desde la biología o la medicina, sin embargo, su relación con la arquitectura es poco conocida. Se trata de un proceso autorregulatorio de las propiedades de un sistema biológico, tales como el equilibrio en la temperatura, de fluidos, el nivel de azúcar en la sangre, la presión sanguínea, la frecuencia respiratoria y cardíaca, etc. el cual compensa las variaciones en su entorno mediante el intercambio regulado de materia y energía con el exterior. Es decir que, la homeostasis es el proceso mediante el cual los organismos mantienen estables sus condiciones internas, debido a su capacidad de autorregulación.

Esta estructura tensoactiva CLT curva, conduce a un desafío trascendental en la historia de la construcción, el auto modelado, autoconformación o self shaping de elementos prefabricados listos para ser ensamblados. Por tal, la analogía respecto a la homeostasis como un sistema determinante en el proceso de flexión, el cual se logra mediante la deshumidificación, sin que por ello mengüen sus propiedades intrínsecas.

Menges, “Design and Structural Modelling of Surface-Active Timber Structures Made from Curved CLT - Urbach Tower, Remstal Gartenschau 2019”, *Design Modelling Symposium Berlin* (2019): 419, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-29829-6_61

De esta manera, la técnica constructiva posibilita que los componentes torsionados, conjuntamente logren una morfología de doble curvatura que no es necesariamente una superficie sinclástica. En virtud de ello, se podrán desarrollar proyectos con un consumo responsable y más sostenible de recursos.

Este sistema constructivo fue validado a través de Urbach Tower, una estructura vertical tensoactiva sujeta a la acción de membrana y placa de 14 m. de altura, desarrollada por ICD / ITKE en colaboración del Laboratorio de Celulosa y Materiales de Madera en los Laboratorios Federales Suizos de Ciencia y Tecnología de Materiales como una de las 16 estaciones que se construyeron para el Remstal Garden Show 2019 en Alemania. Es la primer estructura de madera laminada cruzada (BSPH/CLT) del mundo hecha de componentes de gran formato que utiliza este novedoso proceso constructivo de auto conformado mecánico a través de listones de madera, en el cual el material se torsiona a sí mismo sin requerimientos mecánicos externos.

Una comprensión de cómo se deforma la madera debido a los cambios en el contenido de humedad es bien conocida en la práctica y en la teoría. Sin embargo, un cambio en el pensamiento de diseño, así como las nuevas simulaciones computacionales para una predicción más precisa sobre su auto torsión, así como en posibles fallas, permite utilizar esta hinchazón y reducción inducida por la humedad para programar movimientos de automoldeación específicos a una escala cada vez mayor.

Debido a la contracción característica de la madera con un contenido de humedad decreciente y su posible predicción mediante modelos de mecánica computacional, estos listones de madera autocurvados abren

nuevas opciones para la industria de la construcción, con su simple adaptación a diferentes radios de curvatura. La tecnología de producción autoformada inaugura nuevas e inesperadas posibilidades arquitectónicas para el uso de la madera disponible regionalmente.

La madera de abeto noruego contiene un alto nivel de humedad y en su proceso de secado industrialmente estandarizado, estas bicapas o listones de madera cruzada a 90° de 5,0 mx 1,2 m se autoconforman en curvas precisas. Son listones de madera precalculados en sus dimensiones materiales finales y estructuralmente estables cuando se retiran de la cámara de secado, al retirárseles la humedad presente.

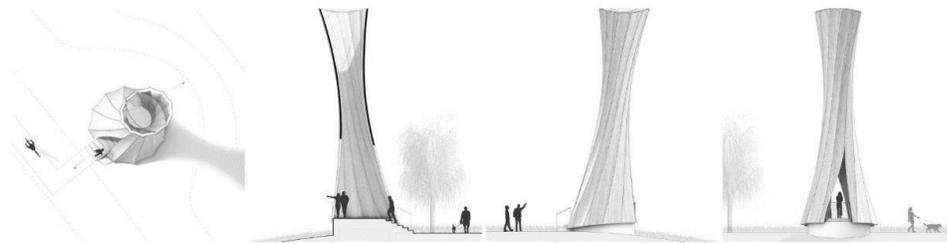


Fig. 32. Torre Urbach, vistas.

La acumulación de material se utiliza con la orientación de la fibra primaria perpendicular a la curvatura principal y en el eje longitudinal del componente, de esta manera se utilizaron dos tipos de material CTL:

- Curvo, producido con prensado mecánico estándar sobre encofrado.
- Curvo autoconformado.

En esta metodología de diseño computacional tripartita, la geometría global depende de la curvatura de sus componentes individuales y viceversa, aun cuando las placas CLT tienen una gran curvatura en relación con el tamaño de las piezas.

El proceso de *formfinding* se logró mediante la intersección conjunta de 12 superficies cilíndricas, formadas por las bicapas auto conformables para fabricar *rohlings* curvos a partir de los cuales se recortaron y detallaron cuatro de los doce componentes mediante una máquina CNC de cinco ejes.

De esta manera, el ensamble de los elementos de una curva genera una forma dinámica doblemente curvada. **La configuración constructiva** se basó en una interacción continua entre modelos Nurbs y una combinación con simulaciones numéricas basadas en FEM. Una interfaz personalizada del modelo geométrico de elementos finitos (FE) permitió ajustar los parámetros de diseño estructural y de fabricación de forma interactiva. Todo ello generado mediante “modelos mecánicos computacionales, tanto para planificar la disposición del material como para optimizar la disposición del material requerido para producir varios tipos de curvaturas y radios con la precisión necesaria.”¹⁰⁸

¹⁰⁸ Ibid.

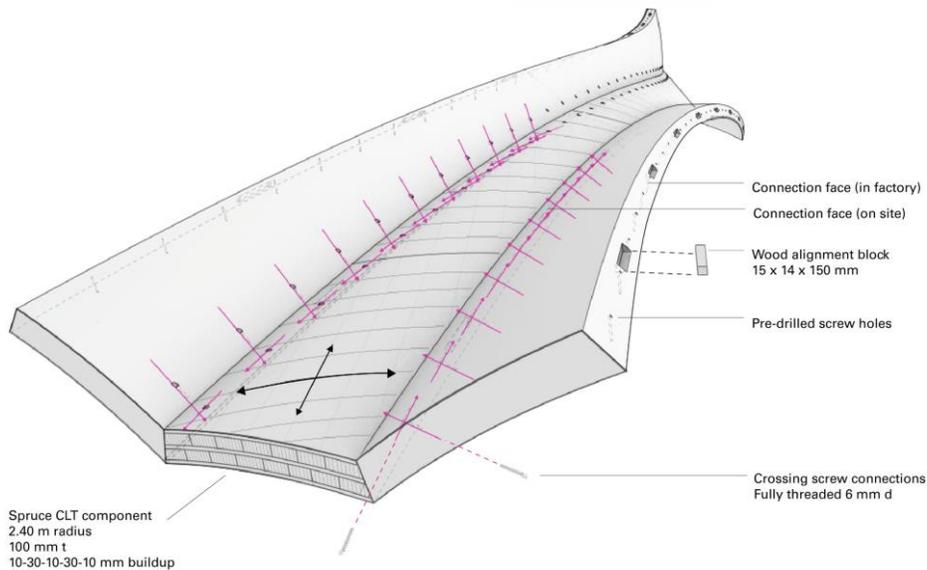
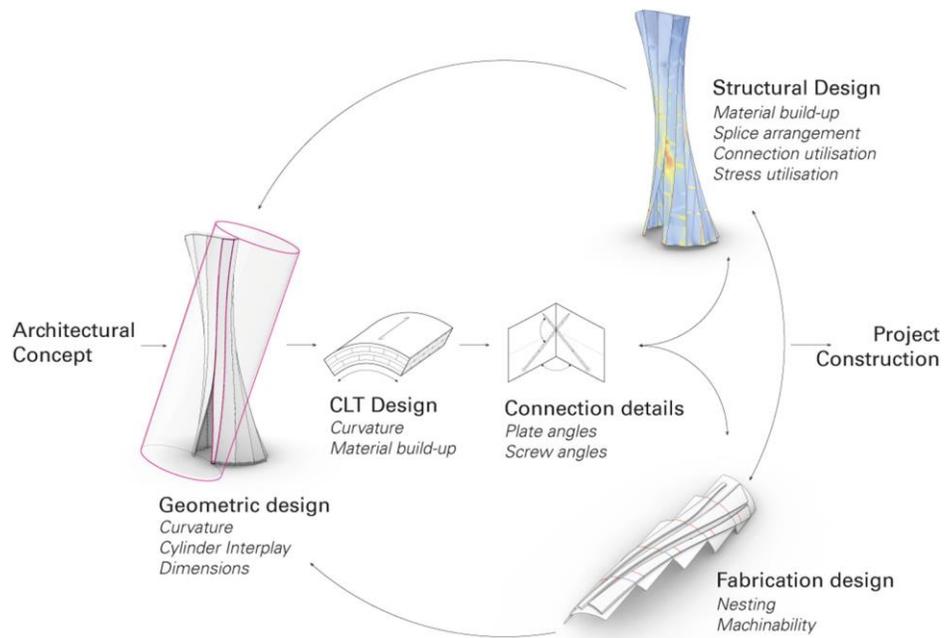


Fig. 33. Torre Urbach. Modelo arquitectónico.

Fig. 34. Torre Urbach. Modelo estructural.

Estrategia del sistema conectivo

En el estado de ensamblado, la torre actúa como una estructura de superficie activa. Los listones torsionados se conectan mediante tornillos

cruzados, cuya disposición y ángulo específico se optimizan en toda la estructura para lograr transferencias de carga homogéneas. Para reducir el mecanizado requerido y facilitar el montaje de bordes complejos, se utiliza una junta de inglete entre los listones prefabricados.

La torre culminó con un techo curvo de acero y policarbonato, aunado a ello, se agregó una capa de madera de alerce laminada con pegamento de 10 mm de espesor, así como un recubrimiento de óxido metálico para el tratamiento de protección UV para que la superficie se aclarará con el tiempo, en lugar de oscurecer.

Durante la vida útil planificada para 10 a 15 años, la estructura se monitoreará continuamente con sensores WMC integrados, sensores climáticos y escaneo láser iterativo para detectar deformaciones. Las acciones de carga se definen de acuerdo con las regulaciones normativas, sin embargo, los códigos europeos cubren solo tipologías estandarizadas. Así, las estructuras geoméricamente complejas exigen un proceso de racionalización de la geometría y de interpretación de las regulaciones del código. Además, muchas iteraciones de diseño requieren la implementación de una aplicación de carga adaptativa en el flujo de trabajo digital. Las principales acciones de carga en la estructura son escenarios de carga de viento. Causan momentos de flexión globales del voladizo, así como una ovalización de la sección transversal aproximadamente circular dodecagonal.

Como **logros técnico-constructivos**

Sistema poligonal de madera para membranas anticlásticas

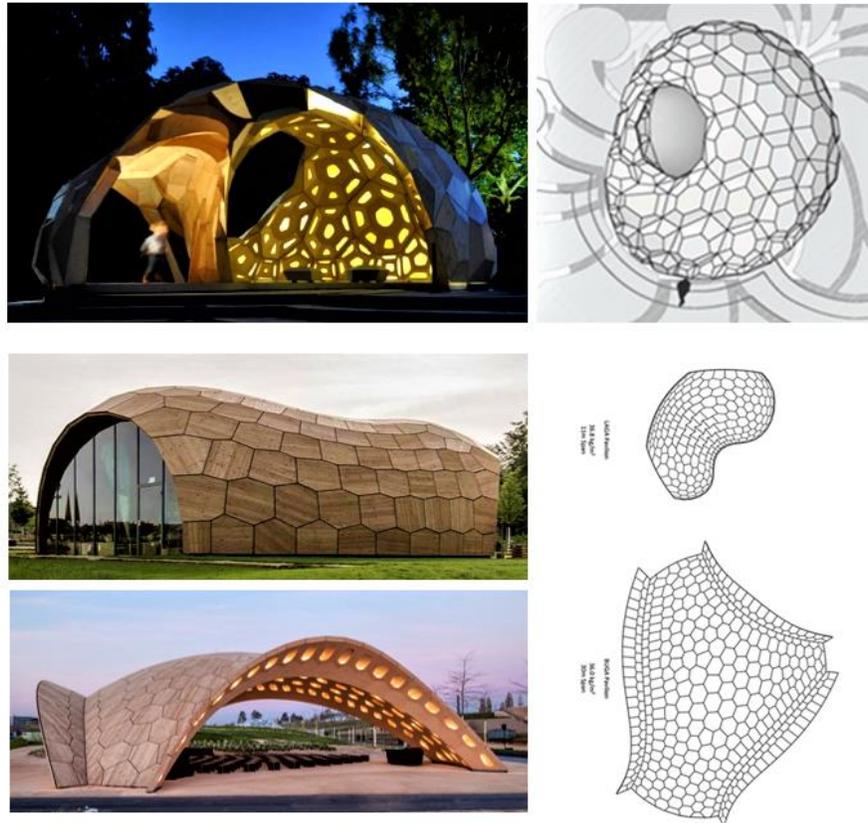


Fig. 35. Pabellones ICD / ITKE 2011, LAGA y BUGA respectivamente.

Las membranas seudo cupulares se han conformado a través de sistemas de polígonos irregulares con amplias libertades geométricas. Existe un paralelismo con las estructuras geodésicas de Fuller, ya que ambas metodologías están inspiradas en modelos de la naturaleza que se componen de polígonos interconectados, son diseñadas y manufacturadas economizando recursos y manteniendo una alta eficiencia. Los pabellones aquí expuestos, se conforman a través de un sistema de poliedros irregulares inscritos en una circunferencia. Aquí, el término de efemerización «hacer más con menos» propuesto por Fuller en 1969 se logra a cabalidad.

En este lenguaje geométrico desarrollado en un entorno tecnológico y sostenible, su eficiencia recae en sus aportaciones respecto a la funcionalidad, la poca cantidad de material para lograr grandes volúmenes en menor superficie y desde luego prescindir de un sistema de cimentación. Ante esta coyuntura, la gestación de sistemas constructivos para membranas ligeras, sismorresistentes y carentes de soportes interiores se han convertido en el foco de las actividades de ICD/ITKE, las cuales les han servido de aval para la fabricación de una serie de pabellones.

Durante esta última década, la diseminación de sus postulados ha fomentado el tránsito de las tradicionales *gridshells* hacia membranas semiesféricas que atienden el concepto de línea geodésica, es decir “la línea de mínima longitud que une dos puntos en una superficie”¹⁰⁹.

Bajo este cambio de paradigma constructivo han surgido los sistemas estructurales de polígonos de madera laminada para membranas anticlásticas. En esta estrategia, la adscripción del enfoque biomimético se trata del Echinoidea - erizo de mar - y Clypeasteroidea - dólar de arena -. Una de sus particularidades más sobresalientes se refiere a la **segmentación modular en un entramado poligonal inscrito en una circunferencia**, lo que le posibilita una enorme adaptabilidad y rendimiento. Ello conjuntamente con la intuición creativa ha permitido la concepción de los pabellones ICD / ITKE 2011, LAGA y BUGA, en los cuales se pretende “...integrar las cualidades performativas de las estructuras biológicas en la arquitectura, diseñar y probar estos resultados en un sistema espacial

¹⁰⁹ <https://es.wikipedia.org/wiki/Geod%C3%A9sica>

y estructural.”¹¹⁰ de polígonos irregulares de madera con sus respectivas variaciones.

En estos principios bio constructivos de auto organización son insustituibles tres premisas:

- Heterogeneidad: Los tamaños de las celdas no son constantes, sino que se adaptan a las curvaturas y discontinuidades locales. En las áreas de pequeña curvatura, las celdas centrales tienen más de dos metros de altura, mientras que en el borde solo alcanzan medio metro.
- Anisotropía: El pabellón es una estructura direccional. Las células se estiran y se orientan según la tensión mecánica.
- Jerarquía: el pabellón está organizado en una estructura jerárquica de dos niveles. En el primer nivel las uniones de los dedos se unen para formar una celda. En el segundo, una simple conexión por tornillo une las celdas, permitiendo el montaje y desmontaje del pabellón.¹¹¹

En el contexto de membranas de madera ligeras como estructuras de carga primaria, el uso de paneles planos trivalentes para su conformación integral representa una solución estructural extraordinaria dado que son excepcionalmente performativos, desafortunadamente: “Dichos paneles generan una acción de caparazón y transfieren cargas externas a fuerzas de membrana. Sin embargo, las conexiones entre placas segmentarias casi siempre debilitan las estructuras de la cáscara, ya que perturban la continuidad del material y, por lo tanto, su rigidez.”¹¹²

¹¹⁰ Ricardo La Magna y Jan Knippers, “Nature-inspired structural optimization of freeform shells”. *Structures and Architecture. Concepts, applications and challenges. Conference: ICOSA 2013- Structures and Architecture* (2013): 4, doi: 10.1201/b15267-163

¹¹¹ *Ibid*, 5.

¹¹² Jian-Min Li y Jan Knippers, *Segmental Timber Plate Shell for the*

Según Jan Knippers, los paneles trivalentes y su correcta disposición dentro de una membrana no requieren juntas rígidas, tal ventaja en el rendimiento estructural es un patrón ampliamente visto en la naturaleza. Dado la importancia de las juntas entre paneles, resulta necesario desarrollar un sistema conectivo que mengüe las desventajas anteriores. Los investigadores crearon un sistema para la disposición de placas y los detalles de la junta, con modelado de elementos finitos "...se desarrolló un detalle de conexión de la articulación del dedo, en el que el empuje principal de las fuerzas de corte se transfiere al plano de la placa de madera por las superficies de contacto laterales entre las juntas."¹¹³ A estas articulaciones se les demonina "ligamentos suturales de colágeno.

La cáscara del dólar de arena consta de un sistema modular de placas poligonales, que están unidas entre sí en los bordes por protuberancias de calcita en forma de dedos. La capacidad se logra mediante la particular disposición geométrica de las placas y su sistema de unión. Por tanto, el dólar de arena sirve como modelo perfecto para conchas de elementos prefabricados... las articulaciones de los dedos tradicionales que se utilizan típicamente en carpintería como elementos de conexión, pueden verse como el equivalente a las protuberancias de calcita del dólar de arena.¹¹⁴

Landesgartenschau Exhibition Hall in Schwäbisch Gmünd—the Application of Finger Joints in Plate Structures. *International Journal of Space Structures*, Vol. 30 No. 2 (2015): 123, doi: 10.1260/0266-3511.30.2.123

¹¹³ Ibid.

¹¹⁴ Ricardo La Magna y Jan Knippers, "Nature-inspired structural optimization of freeform shells". Structures and Architecture. Concepts, applications and challenges. *Conference: ICOSA 2013- Structures and Architecture* (2013): 4, doi: 10.1201/b15267-163

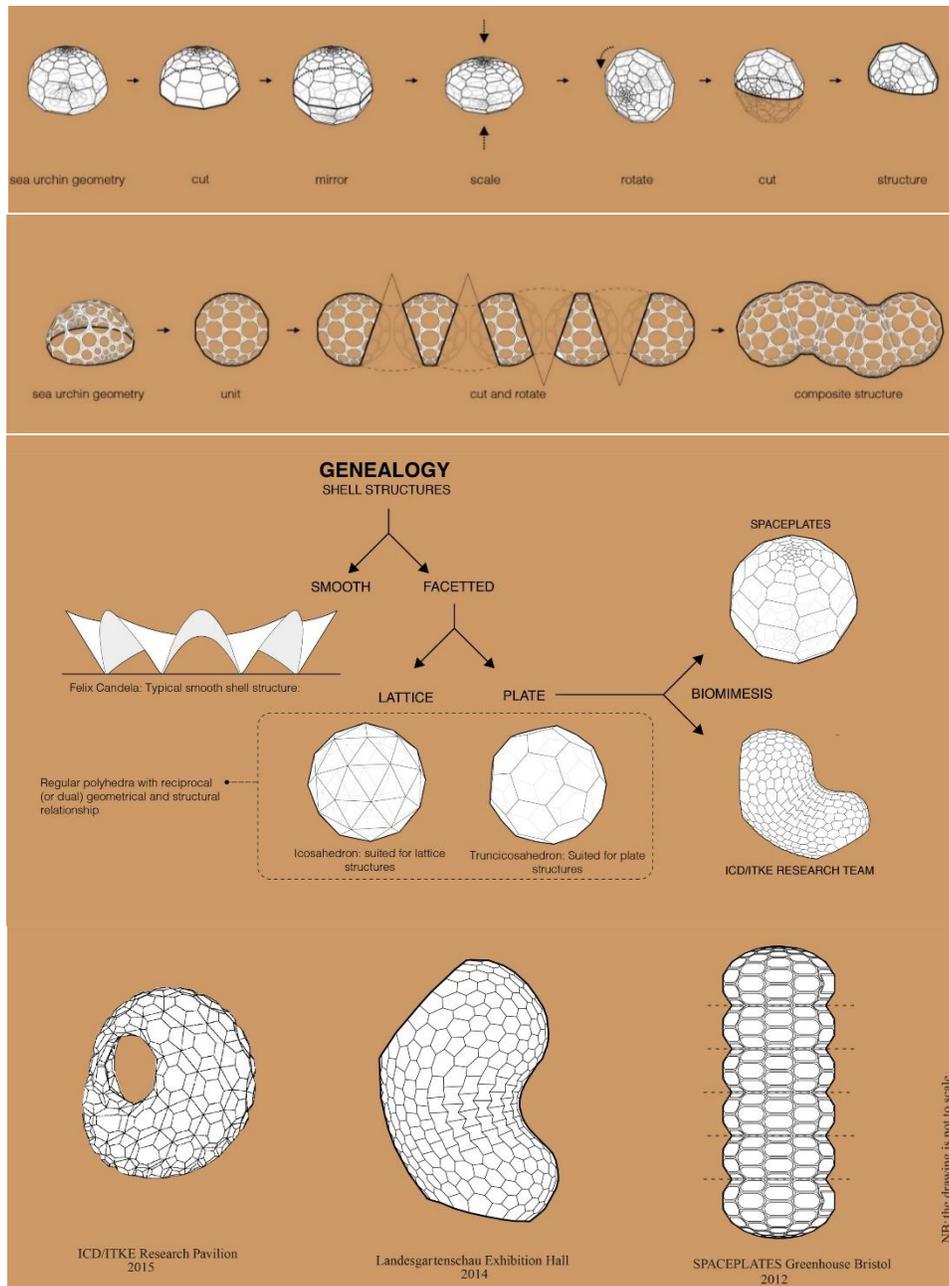


Fig. 36. Estructuras de polígonos de madera.

En virtud del carácter experimental de estas membranas:

... fue posible probar hipótesis, validar métodos, obtener nuevos conocimientos y en la línea de modelos para pensar, hacer nuevas

preguntas de investigación que se investigaron en proyectos posteriores. Además de la investigación y la transferencia a la arquitectura de ciertos principios de desarrollo estructural del esqueleto del dólara de arena, el enfoque se centró en preguntas y objetivos arquitectónicos, estructurales y relacionados con la producción.¹¹⁵

Discretización y optimización morfológica mediante asociación paramétrica.

En todos los casos se configuró una **partición controlada paraméricamente de la membrana para conseguir una optimización geométrica de los componentes estructurales**. Los principales parámetros que controlan el tamaño y el estiramiento de las celdas individuales que componen la partición global surgieron a través de diagramas de Voronoi, los cuales representan celdas poliédricas individuales:

Una malla hexagonal regular sirvió como base para el proceso de panelización, que se logra relajando el diseño de la célula en la superficie, manteniendo el control del grado de distorsión de cada celda. El control específico del proceso se logra variando los valores de rigidez. Esto hizo posible analizar rutinariamente diferentes particiones geométricas que se acoplaron en paralelo a un análisis FE... Se tuvieron en cuenta diferentes funciones objetivas, principalmente estrés global, reacciones de apoyo y distribución de fuerzas internas entre las articulaciones.¹¹⁶

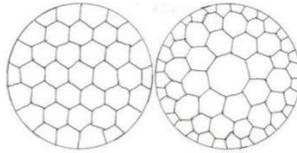
¹¹⁵ Jan Knippers, Ulrich Schmid, Thomas Speck, *Biomimetics for Architecture. Learning from Nature*, (Basilea: Birkhäuser 2019), 117.

¹¹⁶ Ricardo La Magna y Jan Knippers, Nature-inspired structural optimization of freeform shells. *Structures and Architecture. Concepts, applications and challenges*. (2013): 5, doi: 10.1201/b15267-163

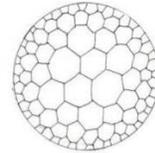
Definición del proyecto:



1_ Estudio morfológico del caparazón de un erizo de mar



2_ Disposición de un entramado poligonal (6 y 7 lados) inscrito en una circunferencia



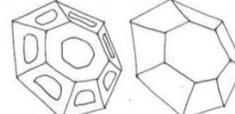
3_ Redistribución del entramado para que pueda adaptarse a la volumetría exterior. Conjunto de hexágonos y heptágonos



4_ Se levanta el centro de la circunferencia creando un volumen con forma similar a la de una cúpula



5_ Se introducen variaciones a la volumetría para crear los accesos al pabellón



6_ Se recubre el entramado de volumen con elementos tridimensionales formados por 2 caras: la interior (porosa) y la exterior (opaca)

Arquitecturas efímeras con herramientas paramétricas_ M^a Pilar Viamonte Fernández

17

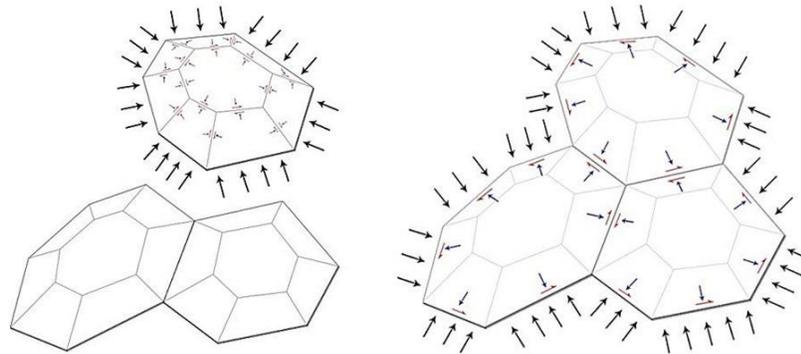


Fig.37. Proceso morfológico para el pabellón ICD/ITKE 2011

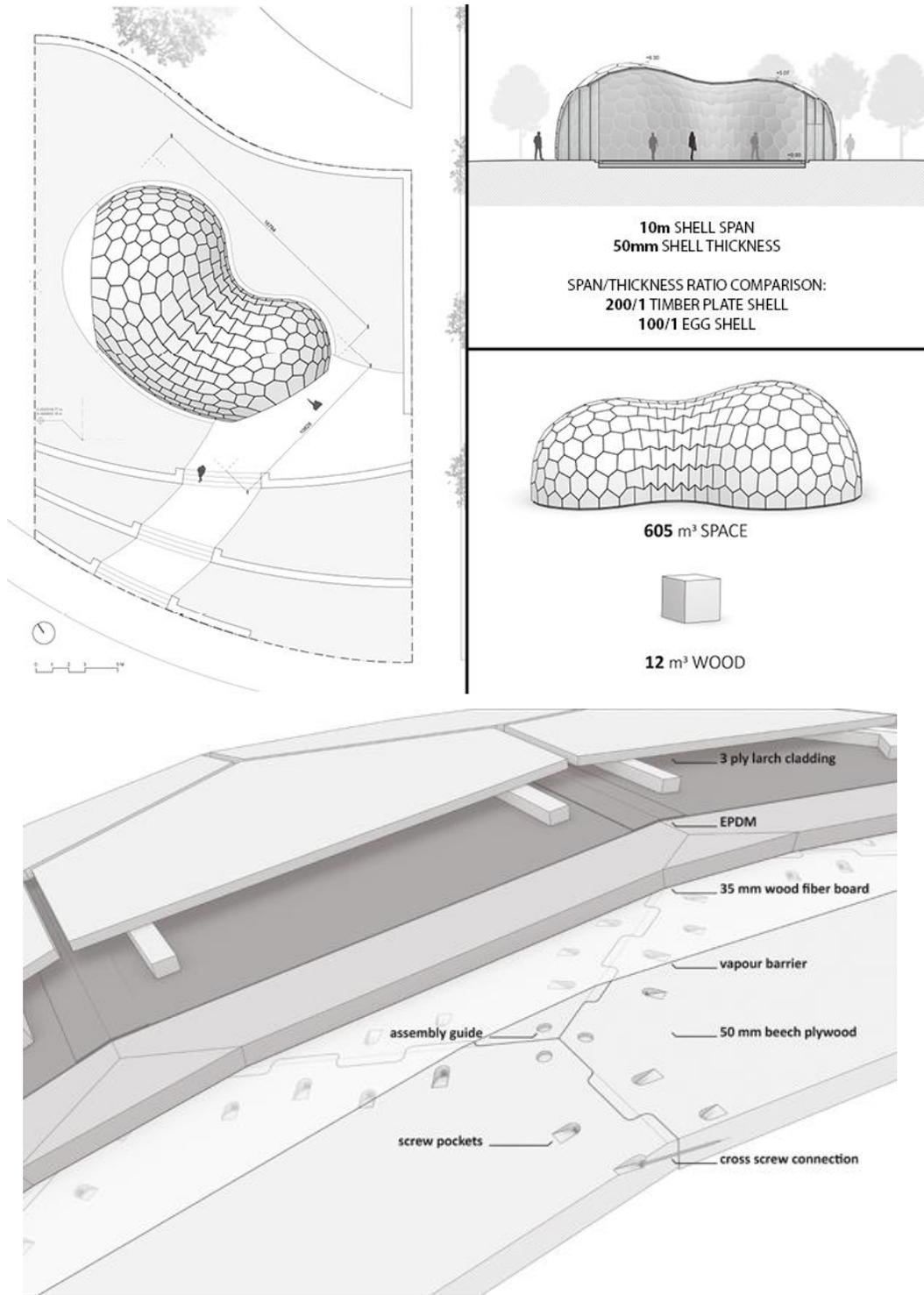


Fig. 40. LAGA. Planta, corte y alzado.

Fig. 41. LAGA. Sistema conectivo.

https://www.oliverdavidkrieg.com/?page_id=559

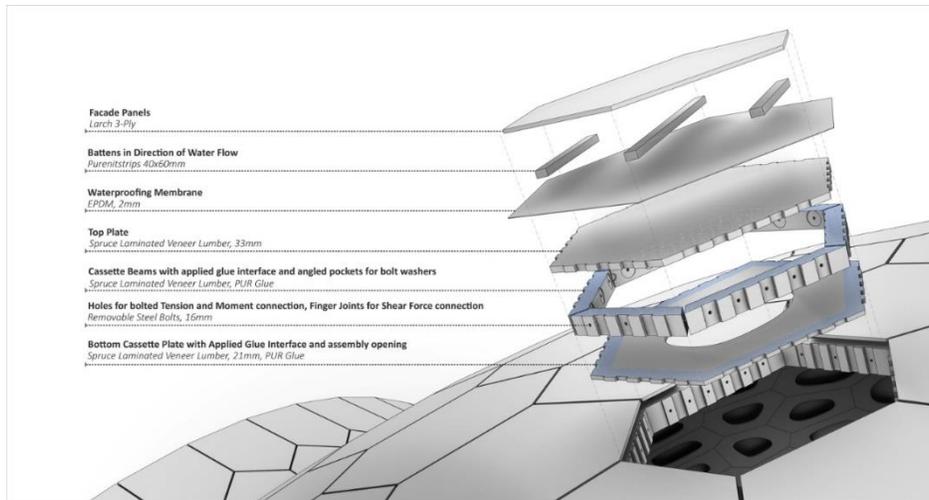
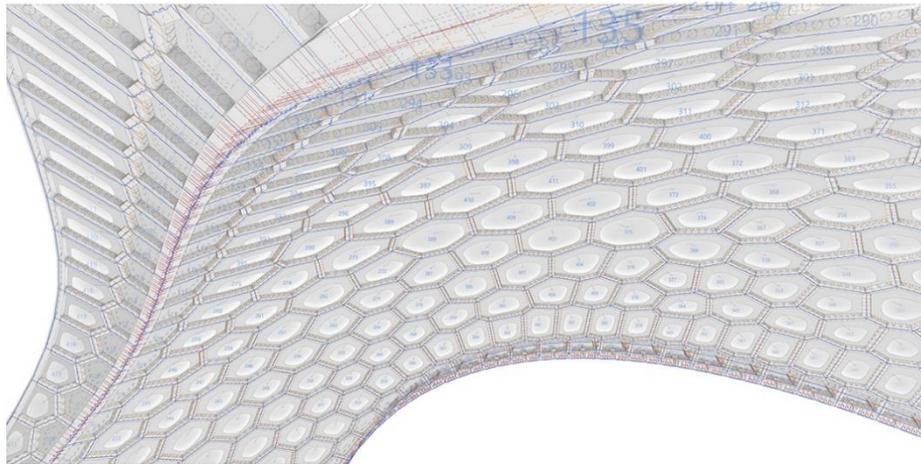


Fig. 42. BUGA Wood pavilion. Circunferencia paramétrica, modelo.

Fig. 43. BUGA Wood pavilion. Sistema poligonal.

Las morfologías de las membranas conformadas por placas de madera segmentada inevitablemente se discretizan en superficies poliédricas mediante elementos planos que configuran superficies doblemente curvadas. “Entre ellas, las mallas planas hexagonales (PH-mallas) son de especial interés por su simetría y propiedad dual con una malla triangular. Una malla PH pertenece al grupo de

poliedros trivalentes, cuyo vértice es la intersección de los tres polígonos cercanos.”¹¹⁷

Integración de la generación de formas computacionales y el comportamiento físico estuvo basado en modelos personalizados de FE Solver se resolvieron los poliedros para la fabricación de las membranas. Se utilizó el mismo proceso para desarrollar sus respectivas cavidades en forma de dedos, mediante las cuales se resuelven las juntas.

La configuración de fabricación robótica de las placas de madera performativa se produjo empleando rutinas programadas personalizadas. El modelo computacional proporcionó la base para la generación automática del código CNC para el control robótico de alta frecuencia. Ello aporta mayores grados de libertad en su rango de movimientos que la maquinaria CNC común, pero cuestiona cómo las diferenciaciones geométricas poliédricas pueden ser utilizadas para encontrar patrones de estructura de placa con una determina capacidad de actuación.

Por otro lado, Rhino generó la ruta de fresado del código CNC para cada los poliedros, la alta capacidad de carga se logró mediante la disposición geométrica particular de éstos y su sistema conectivo. La fabricación de alta precisión de estas articulaciones se llevó a cabo con variaciones angulares. Ello, facultó diferenciaciones topológicas y estructurales, permitiendo que el sistema reaccione a diferentes parámetros estructurales como la deformación bajo autocarga.

¹¹⁷ Jan Knippers, “Pattern and Form -Their Influence on Segmental Plate Shells”. *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures. (IASS) Symposium 2015, Amsterdam Future Visions (2015): 2,*

El sistema modular fue ensamblado con las perforaciones preestablecidas en los diseños mediante el uso de la simulación computacional, así se regularizó la forma orgánica original y se llevó la solución geométrica de las uniones naturales a las juntas entre las piezas de los pabellones, conectadas de manera que no se produjesen momentos de fuerza.

El tamaño de los paneles o cajas no es constante, está adaptado a la (futura) curvatura y discontinuidades locales. En las áreas de pequeña curvatura, las células centrales tienen más de dos metros de altura, mientras que en el borde solo alcanzan medio metro.

Estas exploraciones bio-morfológicas performativas ponen de manifiesto la importancia de las articulaciones entre paneles, lo cual supone que, si su sistema conectivo se desarrolla adecuadamente, es posible reducir las fuerzas naturales que afectan la rigidez estructural de este tipo de membranas.

Estos pseudo domos geodésicos de doble curvatura cumplieron el objetivo de testear métodos de biodiseño robótico computacional en una cubierta modular ultraligera por medio de casetones poliédricos. Estas membranas poseen una concatenación espacial doble, en la cual es posible percibir la lógica constructiva y las horadaciones que modulan tanto el sistema lumínico artificial como la acústica de los pabellones.

Como logros técnico-constructivos, los prototipos posibilitaron la optimización de los sistemas conectivos al mejorar la disposición de las juntas, reducir el grosor de los polígonos y por tanto la masa de los sistemas estructurales.

Resultó fundamental el desarrollo de los sistemas de juntas, ya que sin estos conectores, las cubiertas se debilitarían estructuralmente, es

por tal el uso de los paneles trivalentes prefabricados. Con este tipo de articulaciones los casetones responden eficientemente a las cargas y se logra conformar un sistema estructural apto para la arquitectura. Además de ello, se plantea una vida útil de 5 años dado que los edificios son completamente cerrados y a prueba de agua, por tal, se requieren escaneos láser continuamente para analizar el desempeño estructural.

Aunque es innegable la fatiga material, lo cierto es que en este tipo de estructuras efímeras lo importante lo representa el conjunto material, por tanto, si alguna pieza sufriera un desperfecto individual, lo ideal sería reemplazarla y el casquete mantendría su funcionalidad, materialidad y características estructurales óptimas.

Las cubiertas representan un punto de partida para futuras investigaciones en tanto que son obras referenciales respecto a su técnica de fabricación, su sistema modular de paneles poliédricos y su sistema conectivo. Su innegable su calidad plástica, su iconicidad y unicidad logran establecerse dentro de las obras arquitectónicas a tener en cuenta, por ser un referente constructivo como la solución a un problema, una respuesta idílica a determinados cuestionamientos.

Estas indagaciones dan testimonio de la importancia de la interacción de los sistemas constructivos entre forma, estructura, material y espacio. Las complejas interacciones entre la forma y su materialización se determinan dentro de procesos computacionales imaginado como un sistema biológico en donde la generación computacional de la forma está directamente dirigida e informada por el comportamiento físico y las características del material.

El progreso en estas membranas exhibe que la fabricación robótica es un mecanismo viable para crear edificios que cubren cada vez mayores claros utilizando menos material inscrito de cualquier complejidad formal, promueven activamente la utilidad del bosque respecto a la sociedad y medio ambiente.

La madera de haya contrachapada tiene un módulo de Young de 17000 N / mm^2 y una densidad de 730 kg / m^3 , lo que da como resultado un módulo específico de 23.3 (E /). Es comparable al del acero y aproximadamente cuatro veces mejor que el concreto mientras se usa solo una fracción de la energía requerida para producir el edificio específico producto.

Resulta en una cubierta creada mediante 243 paneles de 50 mm de grosor todos con geometrías y tamaños diferentes, fabricada con solo 12 m^3 de madera. Abarca 17m de altura en su punto cumbre y 11m de largo. Esta estructura fue resuelta mediante 2 superficies sinclásticas en forma de cúpula y separadas por una superficie de transición anticlástica – áreas superficiales menores en la parte central - en forma de silla de montar. Juntas, ambas zonas proporcionan aproximadamente 125 m^2 de área cubierta:

Conclusión

Las estructuras en madera aquí analizadas amplían las posibilidades para regresar el uso de la madera como material de construcción y con ello suplir progresivamente al concreto.

La planificación, el diseño, la virtualización, la producción y la (pre) fabricación de membranas de madera, a través de la (pre) fabricación de polígonos irregulares para formar una membrana sin encofrados sería imposible sin la robotización en la construcción. Estos sistemas de fabricación podrían transferirse hacia losas alveolares de entepiso, lograr claros de grandes vuelos y coexistir con otras técnicas de fabricación en función de alcanzar un proyecto lo mejor optimizado posible, más allá del ámbito meramente formal.

La evaluación de estas robotécnicas ha demostrado que la optimización no se opone con la innovación arquitectónica, contrario a ello, estas técnicas generan una convivencia que da como resultado un edificio mejor optimizado. Con la introducción de los llamados sistemas de producción ciberfísicos, la roba arquitectura ha diluido las restrictivas fronteras entre diseño, planeación, simulación y fabricación. Los pabellones además de representar una serie de escaparates materiales para exhibir las potencialidades de la programación computacional y su fabricación robotizada, aquilatan una cadena consecutiva de revolucionarias investigaciones sobre TDCFR que han logrado descifrar patrones biológicos que permiten para tomados en el desarrollo de procesos arquitectónicos análogos.

En virtud de ello, la arquitectura con madera experimenta un nuevo desplegado de posibilidades y por ende, los estudios al respecto han aumentado significativamente.

Al explorar los progresos de las membranas de madera se han reunido poderosas experiencias edificatorias en las cuales se replantean los sistemas constructivos para reimaginar a través de movimientos formales, conjuntos arquitectónicos que revelan nuevas constructivas. Los resultados ejemplifican procesos de discretización donde cada elemento es analizado previamente como un ente constitutivo autónomo.

Aun cuando los temas de sostenibilidad, ecología y cuidados medioambientales sean prioritarios en la construcción, es muy pronto para afirmar que este siglo le pertenecerá a la madera como material predominante. Dichos factores que en su conjunto suman en favor del cambio climático han encausado el regreso de la madera a nuestro oficio, ello viene acompañado a manera de pseudo cúpulas e impulsado por sus propiedades mecánicas y estructurales mediante entramados de sistemas compuestos de paneles contralaminados y encolados.

Las robotécnicas constructivas demuestran que la fabricación impulsada por robots es un método legítimo para la construcción de edificios, particularmente cuando los diseñadores desean crear complejidad formal con componentes heterogéneos y optimizar los recursos materiales. Este esfuerzo también cierra la brecha entre el producto y la construcción: a medida que la madera contrachapada se transforma en paneles entrelazados, el sistema de construcción único se vuelve inseparable del producto final.

Pese a que los paneles de madera de BUGA están conformados por una triple capa, son más ligeros que los utilizados en el LAGA pavilion y éstos a su vez representan menor carga que el pabellón 2011. La diferencia entre un sistema conectivo y otro es muy clara:

en 2011 se utilizó una especie de machihembrado semejante a los ensambles de madera en la arquitectura japonesa tradicional como las técnicas *okuriari* o *isukatsu*, etc., mientras que en LAGA y BUGA sus juntas conectivas se lograron mediante la efectiva disposición de perforaciones con ángulos que van de a 15 ° a los 90 ° para recibir su respectivo atornillamiento con pernos removibles, lo cual permite una precisión submilimétrica.

La alternación de los entramados, así como la estandarización de sus poliedros han logrado consiguientemente una eficacia estructural que agiliza los procesos edificatorios. La descomposición o discretización de los casquetes semiesféricos en un sistema poliédrico irregular, que incluye tanto a los paneles tripartitas, así como a sus ensamblajes. Ello ha llevado a conformar una subestructura prefabricada a través de la reducción de elementos casetonados con una excelente eficacia estructural.

La sentencia aristotélica “el arte imita a la naturaleza” queda de manifiesto en este capítulo debido al inminente protagonismo de la biónica en los procesos de diseño computacional y fabricación robotizada. Las herramientas capaces de replicar las formas y funciones de los organismos naturales han generado propuestas constructivas sin precedentes. La creación arquitectónica de geometrías orgánicas a través de procesos computacionales avanzados yuxtapone organismos biológicos con herramientas robóticas de alta precisión y especialidad. Al acotar sus rasgos beneficiosos, surgen una serie de características prácticas tales como el máximo aprovechamiento del espacio, su resistencia sísmica, mínimo uso de recursos, fácil montaje y desmontaje, etc. Ello ha sido fundamental para mantener las investigaciones al respecto.

Este capítulo fue consagrado al análisis de una serie de obras arquitectónicas de madera, aprovechando todas sus cualidades posibles. El desarrollo de estos proyectos efímeros se basó en variaciones volumétricas de una cúpula, producto del estudio del caparazón de un erizo de mar, exceptuando la técnica de auto conformación de madera a flexión activa para la torre Urbach.

e innovaciones tecnológicas en estas investigaciones, se resumen en una serie de técnicas edificatorias las cuales consolidan sustancialmente su propia escuela de pensamiento.

Con la revolución tecnológico computacional siempre en periodo transitorio, estas propuestas amalgaman el binomio constructivo tecnológico a través de indagaciones bio-análogas y morfo-espaciales. De esta manera el seccionamiento y elección de determinados procesos metodológicos muestran un marco teórico práctico que atestigua el protagonismo, aunque en distintos lienzos y categorías de la robo- arquitectura. Así, figuras hiper miméticas que materializan una realidad constructiva robotizada se elevan como volumetrías sinusoidales desvinculadas de los estrictos y rigurosos trazos racionalistas.

Más allá de la mera imitación de la naturaleza, la ontogénesis de estos pabellones se encuentra en las referencias biológicas, el entendimiento de cómo los materiales, estructura y formas se funden en un mismo modelo para lograr el mejor desempeño. Apelando a una estrategia proyectual y constructiva recurrente, los pabellones efímeros son resueltos sin excesivas divergencias, todos recurren al mismo modelo biológico y utilizan las mismas herramientas de diseño y fabricación, pero justamente uno de sus mayores logros

radica en que a partir de estas premisas se logra un carácter unívoco en sus edificios.

Cada obra atisba retos cada vez mayores respecto a los alcances de las técnicas constructivas. Estas armaduras evolucionadas bianualmente, corren en paralelo con el desarrollo tecnológico e incluso lo superan al desarrollar sus propios procedimientos tecnológicos para permitir alcanzar los objetivos planteados al inicio de cada armazón.

En términos de indagación metodológica, estas definiciones estructurales se plantean como celdas individuales de geometrías únicas e irregulares que a la vez se corresponden con ahorro material y alto desempeño.

La esencia argumental de estas envolventes de elementos repetitivos cataliza a su vez la pluralidad edilicia con tantas variables como sea posible, así estas estructuras cuyas continuas superficies horadan el paisaje alemán en formas que van aparentemente desde un avispero, un cacahuete hasta el cuerpo de una oruga, se concretan con geometrías que intentan satisfacer sus propios criterios. La búsqueda, reformulación y ampliación de un vocabulario arquitectónico propio de nuestro tiempo, nacen con esta robo-arquitectura, aunque aún en tránsito hacia un periodo más concreto y mejor estructurado o deberá tener como objetivo fundamental la superación de la mecanización de elementos prefabricados.

Aun cuando aparentemente estas membranas arquitectónicas tienden a lo escenográfico o escultórico, su descalificación o veneración resulta sumamente fácil, es a partir de estas técnicas que se ha forjado una estrategia para generar estructuras autoportantes hiper ligeras que sugieren un halo de ingravidez. Para ello, se asiste de programas

computacionales que grafican y simulan propuestas, a la vez que se echa mano de brazos robóticos para su traducción física.

Las soluciones formales logradas que aparentemente quedan supeditadas a conceptos biológicos son la suma de un caudal de operaciones que incluyen desde luego el uso audaz e idóneo de nuevas tecnologías aplicadas a la arquitectura, dejan atrás a las especulaciones gráficas de pioneros como Archigram o Bruno Taut.

Las membranas efímeras corroboran el progreso constante de la arquitectura y además abren la puerta a patrones de diseño decididamente singulares. El desafío primario de estas icónicas estructuras que expresan abiertamente un ideal utópico del futuro en arquitectura, no se refiere a encontrar un lenguaje arquitectónico atípico, sino que se encuentra en lograr la conexión entre la computación, la robótica, la biología, la arquitectura y su fabricación.

Los pabellones exaltan el concepto de ligereza con sus cuerpos geométricos dinamizados, esta característica fundacional de redefinir las concepciones arquitectónicas mediante modelos análogos computarizados y robotizados es un referente aún embrionario. El esmero por aplicar sus propios conceptos al orden constructivo hunde sus raíces en la obra de Otto, ya que a partir de sus premisas es que cada estructura resulta en una mutación morfológica que goza del mismo carácter ingrátido que Frei buscó a lo largo de sus trabajos.

La arquitectura contemporánea debería entenderse como una conjunción entre lo constructivo con la tecnología robótico computacional, para con ello, condensar en los proyectos lo mejor y más novedoso de cada disciplina en aras de lograr referentes arquitectónicos que sobresalgan más que por su iconicidad estética,

lo sean por una aglomeración de características plausibles en términos morfológico estructurales, materiales, de organización espacial, pero sobre todo del orden constructivo. En este punto de la historia de los procedimientos constructivos se ha sustituido el axioma miesiano “menos es más” por más diseño y menos material.

Dado los cambios tecnológicos a los que la arquitectura está sujeta uno de los mayores dilemas que enfrentan los arquitectos en este siglo es esta combinación entre arte, ciencia, optimización, funcionalidad y belleza. La dicotomía entre edificaciones optimizadas y su correspondiente estética es un tema clave en este momento transicional que vivimos en la actualidad. La forma no sigue a la función, la forma sigue a la optimización.

Valdría señalar que todas las estructuras analizadas además de compartir la misma metodología de diseño y fabricación convergen también en las siguientes características:

- Elementos prefabricados colaborativamente con un sistema constructivo sumamente similar. Celdas poliédricas de madera laminada que consiguen su doble curvatura una vez ensambladas.
- Una simple piel de madera de poco espesor que al mismo tiempo resuelve el sistema estructural.
- Estructuras autoportantes, estabilizadas sin ninguna estructura auxiliar adicional que la rigidice.
- Adolecen de una composición ordenada mediante secuencia de espacios jerarquizados, así mismo ha quedado atrás la planta, el alzado y corte para dar pie a su articulación mediante modelos 3d, sobre una axialidad dominante: la doble curvatura.
- Criterios en la disposición espacial son sumamente similares, surgen de una planta circular, la cual se disecciona en segmentos únicos

- Balance ambiental y material.

Si las membranas aquí referidas logran satisfacer las demandas arquitectónicas contemporáneas, así como su partido y programa arquitectónico de manera eficaz, estaremos ante una nueva generación de estructuras de madera computacionales.

Cap. 4 Devanado robótico de filamentos poliméricos de vidrio y carbono

La arquitectura logró implementar recientemente sistemas estructurales tejidos mediante urdimbres poliméricas de vidrio y carbono, pese a que el surgimiento y aplicación del análisis estructural data de la segunda mitad del S.XIX. Un siglo después se sistematizaron los cálculos matemáticos fundamentales para el desarrollo de programas informáticos que han sido decisivos para la creación de las estructuras que aquí se analizarán:

...los sistemas arquitectónicos en el siglo XX, estaban profundamente limitados por calculabilidad y las limitaciones dominantes de la producción en serie. Con los recientes avances en cálculo, simulación estructural y fabricación robótica, el límite entre las lógicas subyacentes de las estructuras "naturales" y "hechas por el hombre" pueden repensarse de nuevo.¹¹⁸

La incorporación a la arquitectura, paulatina y sesgada de materiales como son los filamentos poliméricos de carbono (CFRP, filamentos negros) y vidrio (GFRP, fibras translúcidas) ha posibilitado el desarrollo de sistemas edificatorios emergentes, los cuales encuentran un sincretismo entre los dominios físico/virtual:

¹¹⁸ Tobias Schwinn, Riccardo La Magna, Steffen Reichert, Frederic Waimer, Jan Knippers y Achim Menges, "Prototyping Biomimetic Structures for Architecture". *Conference: Prototyping Architecture* (2013): 224, https://www.researchgate.net/publication/305381563_Prototyping_Biomimetic_Structures_for_Architecture

En la construcción, se mantienen en áreas de nicho. La razón principal de esto es probablemente que los procesos de fabricación habituales requieren una construcción de moldes compleja. Esto está asociado con un uso considerable de recursos a menudo cuestionables desde el punto de vista ecológico...Por lo tanto, los procesos de procesamiento que requieren la construcción de moldes solo son económicamente viables y ecológicamente justificables para series. En construcción, en cambio, se suele tratar de piezas únicas o pequeñas series que requieren procesos robustos y sencillos, mientras que las máximas exigencias de precisión, peso muerto o rendimiento, como en la construcción de aeronaves, quedan en un segundo plano.¹¹⁹

GFRP es un material extremadamente fino que consta de numerosos filamentos cerámicos basados en dióxido de silicio (SiO₂). Mientras que CFRP es un filamento largo ultradelgado con un diámetro de aproximadamente 0.0005-0.010 mm (el cabello humano es de 70 µm), un paquete de 50,000 filamentos continuos, llamado remolque o roving, tiene un diámetro de 1.5 mm seco o 2 mm incluyendo resina; esta hecho de átomos de carbono unidos y alineados en paralelo al eje de la fibra. Posee una alta relación fuerza / peso, así como una elevada resistencia a la fatiga y a la corrosión.

El uso de estos materiales de alto rendimiento en arquitectura se encontraba hasta hace muy poco tiempo en un estado de letargo, aun cuando en los años 50 del S. XX se edificaron proyectos tan afamados como la casa del futuro de Alison y Peter Smithson para la London Mail Ideal Home Exhibition en 1956, la casa Monsanto (1955-1957) de Richard W. Hamilton y Marvin E. Goody para el parque temático

¹¹⁹ Integratives computerbasiertes Planen und Bauen: Architektur digital neu denken.

Tomorrowland de Walt Disney y La Maison Plastique de Ionel Schein, para la muestra Arts Ménagers de 1956 en París. Posterior a estos años, la arquitectura con fibras poliméricas entró en un periodo de inactividad.

Las industrias aeroespacial, armamentista y automotriz han superado a las técnicas utilizadas en arquitectura con el uso y desarrollo de materiales Poliméricos Reforzados con Fibras (FRP) gracias a determinadas ventajas respecto a la reducción de peso y su fuerza específica de 780kNm / kg, 10 veces mayor que el acero estructural (45kNm/ kg). Su uso como encofrados en tales industrias es compensado con tiradas de alta producción. Sin embargo, aquellos procesos constructivos en la mayoría de los casos son intransferibles o inadecuados para la arquitectura. Para aprovechar plenamente el potencial de estos materiales en la industria de la construcción, la investigación debe centrarse en el desarrollo de técnicas propias y no intentar transferir estrategias de otras disciplinas.

El caudal de ofertas constructivas de estos materiales compuestos, no forman parte del colorario de las técnicas edificatorias. Tal situación obedece entre otras causas a carencia de mecanismos constructivos adecuados, a la falta de conocimiento sobre el material, sus propiedades, limitaciones y alcances, así como la ausencia hasta hace poco de procedimientos de simulación y de códigos constructivos. Ello ralentiza una implementación exitosa en el campo arquitectónico.

Después de más de medio siglo, las fibras poliméricas han tomado un segundo aire, hoy día su popularidad esta renovada, Para tal efecto, se ha recurrido al Devanado robótico de filamentos sin núcleo (Coreless Filament Winding. CFW). Una técnica de fabricación

aditiva que implica la envoltura o tejido de haces de fibras alrededor de un eje sobre un marco de acero ubicado estratégicamente. Las fibras bajo tensión e impregnadas de resina forman celosías discretizadas por medio de la abstracción y transferencia de principios biomorfológicos en términos estructurales, de disposición y comportamiento material, así como de anisotropía mecánica a proyectos arquitectónicos.

CFW es un método prometedor para la construcción, ya que preserva los beneficios del material tales como resistencia y ligereza, presenta un espectro amplio de autonomía geométrica y favorece la sustitución de moldes o encofrados por membranas ETFE infladas de 0,2 mm de espesor que se envuelven materialmente al sistema constructivo.

“Las fibras empapadas en resina no poseen resistencia a la flexión mientras el epoxi aún está en proceso de secado, sucesivas capas de fibras envueltas sobre las anteriores tienen el efecto de deformar aún más el sistema.”¹²⁰ Carecen de rigidez transversal, pero poseen una excelente flexibilidad, son pocos extensibles y deben estar bajo tensión durante el proceso de bobinado; en cambio tienen resistencia elevada a los esfuerzos de tracción. Las estructuras cuyo principio mecánico trabajan a tracción - esfuerzo a que está sometido un cuerpo por la acción de dos fuerzas opuestas que tienden a alargarlo - poseen

¹²⁰ Frédéric Waimer, Riccardo La Magna, Steffen Reichert, Tobias Schwinn, Achim Menges y Jan Knippers, “Integrated design methods for the simulation of fibre-based structures”. Design modelling symposium Berlin (2013), 4, https://www.researchgate.net/publication/292745702_Integrated_design_methods_for_the_simulation_of_fibre-based_structures

la capacidad de resistir cargas sin existir una deformación excesiva de una de las partes con relación a la otra. Ello se refiere a:

...aquellas que trabajando fundamentalmente a compresión han sido diseñadas por inversión de otra que soportando las mismas cargas trabaja a tracción. Es sabido que un cable sometido a una carga distribuida según su proyección horizontal toma forma de parábola y sometido a una carga distribuida según su directriz, como la que produce su peso propio, toma forma de catenaria.¹²¹

Tal situación implica mandatoriamente simulaciones de modelado mecánico, cálculo estructural mediante técnicas computacionales avanzadas para encontrar modelos de sintaxis expreso para cada técnica constructiva. En términos arquitectónicos, el cuerpo de los haces de fibra de vidrio define la geometría superficial del componente, en tanto que el patronaje de fibra de carbón representa el rigor estructural. Ello se debe a que:

“el módulo elástico de las fibras de carbono es mucho más alto en comparación con las fibras de vidrio. Por tanto, debido a la extensibilidad limitada de la matriz polimérica, la resistencia de los polímeros reforzados con fibra de carbono es mayor que la de los polímeros reforzados con fibra de vidrio.”¹²²

En el dominio computacional, el tejido, devanado, bobinado o enrollamiento de las fibras se denomina sintaxis, es una sucesión

¹²¹ Issac R. López César. Las exposiciones universales: (laboratorio de estructuras): aportación de los edificios construidos con motivo de las exposiciones universales a la historia de las tipologías estructurales de edificación (Tesis doctoral inédita, Universidad de Coruña, 2012), 362, LopezCesar_Isaac_TD_2012.pdf

¹²² Ibid.

continua de polilínea para la colocación de haces de fibra secuenciales que dan como resultado una superficie geométrica. La lógica del devanado (sintaxis) determina la posición y orientación de las fibras y por tanto es responsable del comportamiento mecánico y de las cualidades arquitectónicas.

Debido a la naturaleza anisotrópica de los compuestos fibrosos, la comprensión del flujo de fuerza en los componentes se vuelve crucial para el diseño de la colocación de la fibra. Este patrón, denominado "sintaxis", se refiere específicamente a la secuencia en la que se enrolla la fibra continua. En consecuencia, puede permitir una diferenciación localizada en el recuento de materiales, resistencia al fallo de pandeo y geometría variada.¹²³

Su uso como materiales constructivos amorfos, sin ser albergados en algún otro componente, está en fase experimental, sus posibles aplicaciones en la arquitectura se revisan continuamente para obtener procesos adecuados de fabricación y lograr proyectos que no comprometan la libertad de diseño, ni la seguridad estructural.

La incursión de estos filamentos al parque edilicio, depende del desarrollo de métodos constructivos óptimos para el mejor aprovechamiento de estos materiales, por tanto, la planeación, simulación y desarrollo de los proyectos se codifica mediante cuatro áreas de trabajo, todas bajo el cobijo de la arquitectura:

¹²³ Vanessa Costalonga Martins et al. "FlexFlax Stool: Validation of Moldless Fabrication of Complex Spatial Forms of Natural Fiber-Reinforced Polymer (NFRP) Structures through an Integrative Approach of Tailored Fiber Placement and Coreless Filament Winding Techniques". *Applied Sciences* 10, no. 9 (2020): 7, doi: <https://doi.org/10.3390/app10093278>

- Ingeniería de materiales
- Biología sintética
- Diseño computacional
- Manufactura 3d

La configuración paramétrica para la secuencia exacta del código robótico que permite la generación automática de la sintaxis de devanado dispone de parámetros como dimensiones de los componentes, ángulos entre los bordes y distancia entre capa interna y externa. La geometría final de cada uno de los elementos nace del tensado de las fibras enrolladas y como consecuencia de las interacciones fibra-fibra. Este proceso requiere de una secuencia (sintaxis) de devanado adaptativo que tiene presente las limitaciones estructurales y materiales.

Los compuestos estructurales requieren de tres capas de fibra, la primer capa invariablemente será de vidrio ya que sirve para dar forma y definir las características geométricas. La segunda será de carbono y responde al reforzamiento de la geometría mediante la diferenciación de la densidad de fibra con reglas particulares y adaptadas a cada uno de los componentes. La tercer y última capa, también de carbono responde a la distribución global de fuerzas y a la geometría de los componentes.

En biología, la mayoría de las estructuras de carga son compuestos de fibra... por ejemplo la celulosa, quitina y el colágeno como material matricial que las sostiene y mantiene su posición relativa. El asombroso rendimiento y la eficiencia inigualable de los recursos de las estructuras biológicas provienen de estos sistemas fibrosos. Su organización, direccionalidad y densidad se ajustan finamente y

varían localmente para garantizar que el material solo se coloque donde se necesita.¹²⁴

Durante el proceso de fabricación los filamentos lineales se tensan unas con otras, con cada paso de bobinado se presionan mutuamente haciendo que el material cambie constantemente su estado de equilibrio. Al mismo tiempo, el uso de un método de fabricación robótico y la configuración de un sistema de generación de código paramétrico permiten la diferenciación de diseño en cada fibra, lo que posibilita que tanto la geometría como el estado de tensión de las fibras se ajusten unas con otras constantemente en un proceso dinámico:

Los parámetros clave como la rigidez, las propiedades de resistencia, el grosor, la disposición de la fibra y también la orientación de la fibra se definen primero en Grasshopper y luego se guardan y almacenan en varios archivos .txt. A continuación, ANSYS Workbench (WB) se inicia en modo por lotes a través de un script escrito personalizado. En WB es posible controlar y acoplar diferentes tipos de simulación, desde Structural a CFD, a través del lenguaje de programación Python implementado, sin embargo, la programación de la parte mecánica estructural se basa en el ANSYS Parametric Design Language (APDL).

Las superficies fabricadas a través CFW tienen como objetivos inmediatos la optimización material y estructural mediante la exploración biológica, así como eliminar por completo el uso de encofrados y con ello desarrollar nuevas estrategias de diseño y fabricación.

¹²⁴ “BUGA Fibre Pavilion 2019”, *Achim Menges*, acceso del día 04 febrero 2029, <http://www.achimmenges.net/?p=21027>

Las facultades arquitectónicas en términos de rendimiento material, desempeño estructural, autonomía geométrica, eficiencia de recursos, ligereza y modularidad, así como un novedoso repertorio morfológico inherentes a las fibras poliméricas han sido estudiadas desde el 2011 por investigadores de ICD / ITKE de la UTS. En años recientes se unió a estas investigaciones Innochain Partner FibR, CloudMagnet y C-Lith, desarrollando metodologías de diseño y fabricación testeadas en bioestructuras prototípicas efímeras.

Poseen el mejor potencial de aligeramiento, cualidades tectónico-estructurales óptimas para edificar, por tanto, la arquitectura bioinspirada podría allanar el camino para estructuras más fuertes, más ligeras y de mayor tamaño. Inconvenientemente presentan puntos negativos severos en tanto que requieren una enorme cantidad energética en su producción, ya que por cada tonelada de fibras poliméricas, se emiten 20 t. de dióxido de carbono.

La fibra de carbono también está estrechamente relacionada con los combustibles fósiles, ya que la materia prima más común es el poliacrilonitrilo, un material producido por la industria petroquímica. Las resinas o polímeros activados químicamente que se usan típicamente para fabricar CFRP también son derivados del petróleo. El artículo de 2017 del diario The Guardian, titulado “Fibra de carbono: el material maravilloso con un secreto sucio” revela los impactos de la producción y las dificultades de reciclaje de esta fibra.



Fig. 44. Pabellones de investigación CFW ICD/ITKE 2012-2017.

¿Cómo se construye con un material amorfo prescindiendo de un encofrado convencional? Los moldes personalizados para las geometrías complejas permiten la producción relativamente simple, aunque si bien requieren tiempo, material y gastos monetarios. Sin embargo, esta inversión resulta redituable en industrias manufactureras al compensarse por ciclos de alta producción. CFW como técnica constructiva ha liberado a la arquitectura de encofrados al utilizar marcos de acero como soportes temporales para el devanado de fibras:

...éstas se extienden entre puntos de anclaje definidos en el marco, que controlan su posición y permiten una orientación en continuo cambio...El robot industrial coloca continuamente fibras de vidrio y carbono saturadas de resina, acumulando así gradualmente un molde a medida que las capas anteriores se endurecen y las capas posteriores se colocan.¹²⁵

¹²⁵ Steffen Reichert, Tobias Schwinn, “Fibrous structures: An integrative approach to design computation, simulation and fabrication for lightweight, glass and carbon fibre composite structures in architecture based on biomimetic design principles”. *Computer-Aided Design* 52, (2014): 31, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.02.005>

CFW y sus variaciones constructivas se han encausado hacia la fabricación de estructuras efímeras que anhelan alcanzar mayores niveles de resolución tanto en el plano formal como en el tecnológico-estructural y material. Dichas estructuras han sido verificadas en 2 tipos de superficies geométricas:

(A) Sinclásticas: La curvatura en un punto dado es del mismo signo en todas las direcciones, el centro de curvatura está en el mismo lado de la membrana: ejemplos, la esfera, el paraboloides elíptico, etc.

(B) Anticlásticas: los centros de curvatura están situados en lados opuestos de la superficie. Esto se describe comúnmente como una forma de silla de montar, ejemplos: paraboloides hiperbólico...Resultan de trasladar una curva sobre otra, de curvatura inversa (el paraboloides) o por la rotación de una curva alrededor de un eje (el catenoide). La doble curvatura aporta una doble acción de arco.¹²⁶

Este tipo de cubiertas han sido desarrolladas por pueblos nómadas alrededor del mundo en sus casas de campaña, los romanos las utilizaron en los *velums* de sus anfiteatros, los fenicios, vikingos y egipcios las usaron en las velas de sus embarcaciones, incluso estas superficies están presentes en puentes de la China del S. XV. El desarrollo de estructuras en Europa con el mismo principio de tracción surgió en el S. XIX, pero como aportación de la arquitectura del S. XX - debido al esplendor tecnológico en términos estructurales y a la aparición de nuevos materiales constructivos - surgió esta tipología arquitectónica ultraligera, (tensoestructuras).

¹²⁶ “Las cúpulas de doble curvatura”, ARQUITECTURA Y CONSTRUCCIÓN, acceso 07 octubre 2021, <https://www.interempresas.net/Construccion/Articulos/120256-Las-cupulas-de-doble-curvatura.html>

La metodología de diseño computacional integrado basado en procesos morfogenéticos de estructuras fibrosas biológicas ofrece soluciones para desarrollar una interconexión entre modos de producción virtual/material. Las técnicas edificatorias que a continuación serán examinadas incorporan la morfogénesis computacional, mediante herramientas de diseño computacional ascendente, es decir, “que sintetiza el material y las restricciones morfogenético de fabricación a través del desarrollo de herramientas integradoras de diseño computacional.”¹²⁷

Tal situación aporta geometrías sinuosas de morfoespacios maquínicos, en el cual el tamaño y complejidad morfológica de los elementos discretizados se determinan gracias al tipo de sintaxis elegida. Los compuestos de fibras poliméricas como materiales anisotrópicos programables, posibilitan una experimentación para materiales y su comportamiento estructural, procesos constructivos y morfologías.

¹²⁷ Moritz Dörstelmann, “Integrative computational design methodologies for modular architectural fiber composite morphologies”, *Conference: ACADIA* (2014): 220, doi: 10.13140/2.1.5186.0485

Membranas anticlásticas

CFW negocia las diversas interrelaciones inherentes a un sistema de fibra – fibra gracias a su naturaleza anisotrópica lo cual significa que sus propiedades mecánicas varían según la dirección de carga a diferencia del acero, por ejemplo, que es un material totalmente isotrópico.

Para conseguir las morfologías pretendidas, uno de los mayores desafíos fue el desarrollo e implantación técnica de los procesos correctos de devanado, en tanto que aseguraran una unión consistente fibra – fibra y fibra – marco. La coexistencia entre los haces de vidrio y carbono responde más que a razones ornamentales, surge por consideraciones estructurales, ya que es menester garantizar un contacto apropiado entre las capas para su actuar mecánico como una unidad estructural.

La primer capa de fibra de vidrio define la geometría y sirve de encofrado para las siguientes capas de fibra de carbono, éstas actúan como refuerzo estructural y varían individualmente a través de la disposición anisotrópica de las fibras:

Para cumplir con este requisito, se cortó un volumen globalmente convexo en secciones verticales colocadas radialmente alrededor del centro del volumen, definiendo así las nervaduras del marco. En cada nervio del marco, un perfil sinusoidal definía puntos de anclaje para mantener las fibras en su lugar. Estos puntos de anclaje permiten una secuencia de bobinado flexible necesaria para diferenciar las orientaciones de las fibras en función de los requisitos estructurales

y funcionales, como aberturas y cerramiento, superficies translúcidas o porosas.¹²⁸

Mientras los brazos robóticos definen los bordes de cada componente por medio de procesos de sintaxis, la geometría final emerge a través de la interacción de las fibras, haciendo eco de las indagatorias bio-constructivas realizadas previamente. Para la realización del pabellón del 2012 se siguió una metodología de diseño de abajo hacia arriba, "...se investigaron dos métodos numéricos. El primero trataba de la simulación del proceso de fabricación, mientras que el segundo tenía como objetivo incluir una mejor descripción de la complejidad del material compuesto en un modelo de superficie."¹²⁹

Dentro de las superficies anticlásticas CFW producidas por ICD / ITKE se encuentran, los **pabellones del 2012 y 2013/2014**.

¹²⁸ Jakob Weigele et al. "Fibrous Morphologies. Integrative design and fabrication of fibre-reinforced structures in architecture using robotic filament winding", *Conference: ecaade*, (2013): 552, https://www.academia.edu/26070275/Fibrous_structures_An_integrative_approach_to_design_computation_simulation_and_fabrication_for_lightweight_glass_and_carbon_fibre_composite_structures_in_architecture_based_on_biomimetic_design_principles

¹²⁹ Frédéric Waimer, "Integrative Numerical Techniques for Fibre Reinforced Polymers - Forming Process and Analysis of Differentiated Anisotropy", *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures* 54 no.178 (2013):1, https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/120/1/Integrative_Numerical_Techniques_for_Fibre_Reinforced_Polymers_Forming_Process_and_Analysis_of_Differentiated_Anisotropy.pdf



Fig. 45. Pabellón ICD/ITKE 2012 y 2013-14 respectivamente.

En esta estructura monocasco se exploraron los principios materiales y morfológicos, así como la anisotropía material y morfología funcional de los compuestos de fibras biológicas presentes en los exoesqueletos de los artrópodos, particularmente la cutícula de la langosta americana, (*Homarus americanus*). Ello dio cuenta la cáscara de quitina presente es una estructura ligera altamente eficiente y fuerte que amalgama tareas estructurales y funcionales.

En el proceso de diseño, la respuesta mecánica de FRP se evalúa en primer lugar a través del Método de Elementos Finitos (FEM), proporcionando al analista un conjunto de información crítica para la valoración del rendimiento estructural, mientras que el cálculo se realizó en SOFiSTiK.

Para lograr el **procedimiento de discretización**, se diseccionó a la estructura mediante 5 marcos de acero, en los cuales se entretejen las fibras.

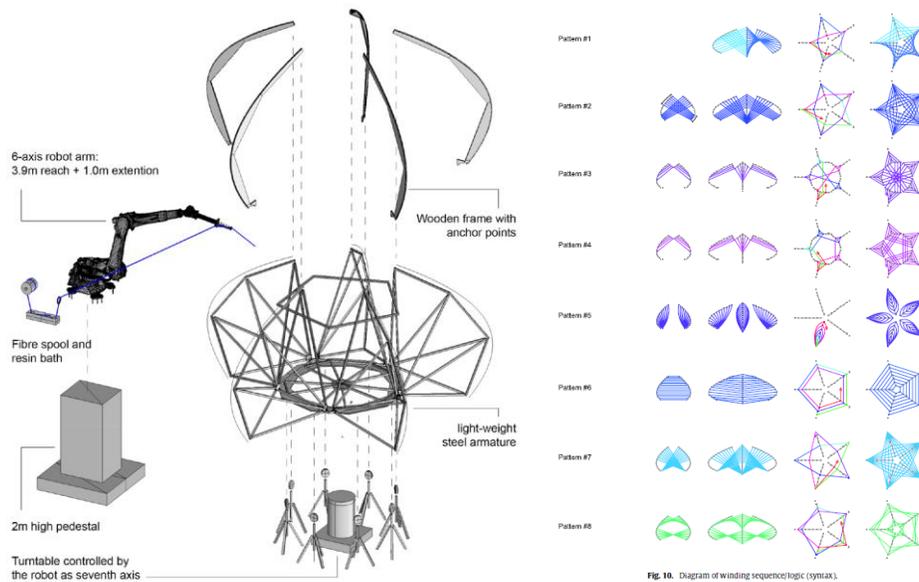


Fig. 46. Proceso de diseño. Pabellón ICD/ITKE, 2012

Fig. 47. Proceso de devanado, gráfica.

Teniendo en cuenta los requisitos arquitectónicos a partir del conocimiento sobre la sintaxis, la propuesta arquitectónica condujo a cinco nervios del marco, generando tres aberturas y dos superficies cerradas. Una vez completado este paso, los marcos de acero, los perfiles de madera y los pedestales fueron retirados, surgiendo con ello una estructura de superficies paraboloides hiperbólicas, resultantes de la primera secuencia de bobinado de fibra de vidrio.

La **configuración de fabricación** se llevó a cabo mediante un brazo robótico industrial de 6 ejes montado en un pedestal de 2 m y una plataforma giratoria externa como un séptimo eje sobre el cual se fijó la armadura modular de acero prefabricada. Con las 5 crestas del marco de acero y sus respectivas aletas unidas, se posibilitó la curvatura prevista.

Dentro de esta etapa, se desarrollaron 5 diferentes patrones de bobinado. El primero genera las superficies hiperbólicas hechas de fibras de vidrio, que proporcionan superficies abiertas y cerradas entre las costillas del marco. El segundo patrón también de fibras de vidrio, condensa las superficies cerradas y mejora la estabilidad de la lámina. Los patrones tercero y cuarto generaron la estructura de la cubierta, una para cubrir el área (fibra de vidrio) y una para construir un anillo de presión dentro de la lámina sinuosa (fibra de carbono). El quinto patrón, nuevamente hecho de fibra de carbono, comprime la estructura vertical en el área de las costillas del marco para apretar la lámina y garantizar la transferencia de carga directo a los puntos de apoyo.¹³⁰

Como **logros técnico-constructivos** valga decir que pese a su considerable tamaño, esta técnica permitió configurar un cascarón semitransparente, - el cual revela la lógica estructural del sistema a través de la disposición espacial de las fibras de carbono y vidrio - de apenas 4 mm y un peso aproximadamente de 320 kg, 8 m de diámetro y 3.5m de altura al enrollar continuamente más de 30 kilómetros de haces de fibra. El tiempo total de la máquina robótica para fabricar el pabellón fue de aproximadamente 130 horas.

Esta cubierta resultó ser el semillero para el desarrollo cada vez más complejo de membranas “biomiméticas, demostrando cómo los principios biológicos de alto nivel, tales como anisotropía, heterogeneidad y multifuncionalidad se pueden integrar con principios de fabricación estructural para lograr un peso ligero y un sistema de materiales performativos a escala arquitectónica.”¹³¹ Además, mediante el uso de métodos computacionales

¹³⁰ Weigele, “Fibrous Morphologies”, 31.

¹³¹ Reichert, “Fibrous structures”, 38.

personalizados, se lograron modelos predictivos respecto a las posibles fallas materiales y estructurales del cascarón.

La pretensión de las fibras resulta esencial, pero en la práctica determinadas situaciones tales como la velocidad del devanado, la viscosidad de la resina, la cantidad de resina en el baño, los ángulos entre el baño, el efector y la estructura dificultan el mantenimiento de una tensión constante. Ello propicia que las fibras se contraigan con diferentes resistencias.

Tal situación cambiará en el año 2021 con el pabellón LIVMATS. Una membrana hecha de fibra de lino - un material que es completamente renovable de forma natural, biodegradable y disponible regionalmente en Europa Central - enrollada robóticamente.

Sistema modular poliédrico de doble capa de filamentos poliméricos

La geometría irregular de los poliedros y su disposición se adaptan a la carga estructural del sistema modular, la dimensión de la membrana resultante no está limitada por la configuración de fabricación robótica, contrariamente argumenta la posible escalabilidad a dimensiones mayores. Ello ofrece procesos alternativos, no solo minimiza el material utilizado para su construcción, sino también a través de su integración funcional en un sistema de construcción de membranas de compresión. La técnica describe una estrategia constructiva para CFW de componentes prefabricados con doble capa de fibra de carbono y vidrio geoméricamente complejos para formar una membrana anticlástica.

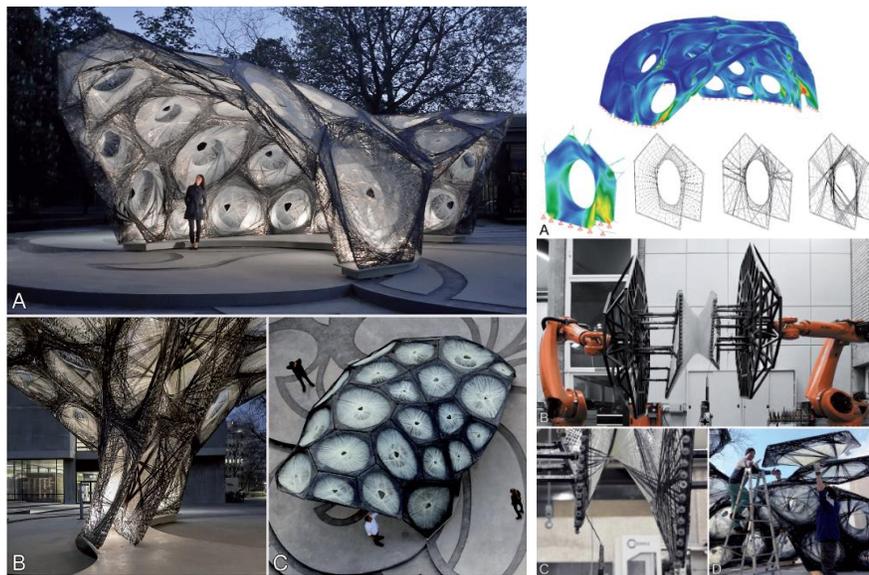


Fig. 3: Completed research pavilion at the campus of the University of Stuttgart. A Front view
B View from inside; note the fiber construction and the two walls. C Top view.
Abb. 3: Fertiger Forschungspavillon am Campus der Universität Stuttgart. A Vorderansicht. B Blick
von innen; man beachte die Faserkonstruktion und die beiden Wände. C Aufsicht.

Fig. 48. Pabellón ICD/ITKE, 2013-14

Los postulados teóricos de estas indagaciones se vertieron en el pabellón ICD / ITKE 2013 – 2014, una estructura de mayores

dimensiones que la de su predecesor, diseccionada en poliedros prefabricados, geoméricamente diferenciados en los que se transportaron determinados principios de 2 especie de escarabajos, el *Leptinotarsa decemlineata* y la *Cassida viridis*. Gracias a modelos 3D de alta resolución obtenidos mediante tomografías computarizadas junto con los escaneos SEM de estas alas rígidas y sus intrincadas estructuras internas fue posible entender que su morfología:

...se basa en una estructura de doble capa que está conectada por elementos de soporte doblemente curvados en forma de columna, las trabéculas. La disposición de la fibra dentro de una trabécula combina los segmentos de la cubierta superior e inferior con fibras continuas. La distribución y articulación geométrica de la trabécula está muy diferenciada en toda la concha del escarabajo.¹³²

El concepto de marco mínimo para crear un sistema de construcción basado en componentes de doble capa anuló la necesidad de encofrado mediante la utilización de un juego reconfigurable de piezas. Esta solución de diseño se amplió enormemente al abrir la oportunidad de crear una gama de geometrías con una inversión mínima de material. Su estructura consta de 2 niveles de capas haciendo referencia a la trabécula del escarabajo. El tejido de fibras permite la conexión de estas capas formando un patrón similar al del elytron, el cual otorga al pabellón una sinergia óptima entre fuerza y peso.

¹³² Stefana Parascho et al. “Modular Fibrous Morphologies: Computational Design, Simulation and Fabrication of Differentiated Fibre Composite Building Components”. *Advances in Architectural Geometry* (2014): 32, doi: 10.1007/978-3-319-11418-7_3

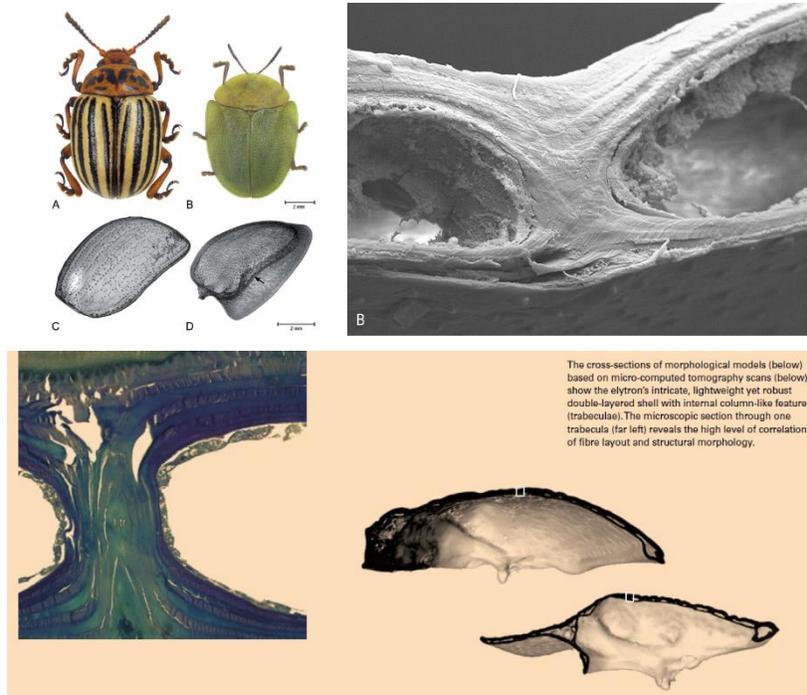


Fig. 49. Beetle elytra como modelo para la construcción de edificios ligeros.

El **proceso de diseño integral** resultó mediante un análisis FE, en el que la estructura global se aproxima como una carcasa continua, dada la orientación de los tensores que son transferidos las fibras que finalmente se corrigen de acuerdo con las restricciones de fabricación. El diseño individual de las fibras de carbono está definido por las fuerzas que actúan sobre cada componente.

La sintaxis del devanado automático incluye 6 capas de fibra. Inicialmente, las fibras se tensan linealmente entre los dos marcos efectores. Las fibras posteriormente enrolladas se apoyan y se tensan entre sí, lo que da como resultado una deformación recíproca. Esta interacción fibra-fibra genera superficies sinclásticas a partir de las conexiones de fibra depositadas inicialmente rectas. El orden en el que las mechas de fibras impregnadas con resina se enrollan en los

efectores es decisivo para este proceso y se describe a través de la sintaxis de bobinado.

La secuencia específica de bobinado de fibra permite controlar el diseño de cada fibra individual, lo que lleva a un proceso de diseño impulsado por el material. Estas reciprocidades entre material, forma, estructura y fabricación se definen a través de la sintaxis de bobinado, que por lo tanto se convierte en una parte integral de la herramienta de diseño computacional.¹³³

Se usaron modelos físicos para pruebas de diseño y sus respectivas variaciones morfológicas, así como para el tipo de sintaxis. Los modelos físicos de cuerda manual son análogos a un proceso de fabricación robótica y podrían usarse para probar posibles problemas de automatización, pero también ilustran la necesidad de una herramienta de diseño integrada que considere el comportamiento del material, el desempeño estructural y las restricciones de fabricación para el diseño y fabricación de compuestos de fibra sin núcleo. componentes del edificio.¹³⁴

¹³³ Jan Knippers, “Modular coreless filament winding for lightweight systems in architecture”, *Conference: CICE 2016 8th International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering* (2016): 3, https://www.researchgate.net/publication/313421984_MODULAR_CORELESS_FILAMENT_WINDING_FOR_LIGHTWEIGHT_SYSTEMS_IN_ARCHITECTURE

¹³⁴ Marshall Prado et al, “Core-Less Filament Winding”, *Conference: Robots in Architecture Conference* (2014): 284, doi: 10.1007/978-3-319-04663-1_19

El **procedimiento de discretización** se llevó a cabo por medio de la extrusión y posterior variación en segmentos de un determinado número de componentes a través de una circunferencia paramétrica, para finalmente obtener los componentes morfológicos idóneos, así como sus respectivos diámetros, alturas, anchuras, vértices, ángulos, etc. El proceso de diseño morfogenético instrumentaliza estas restricciones.

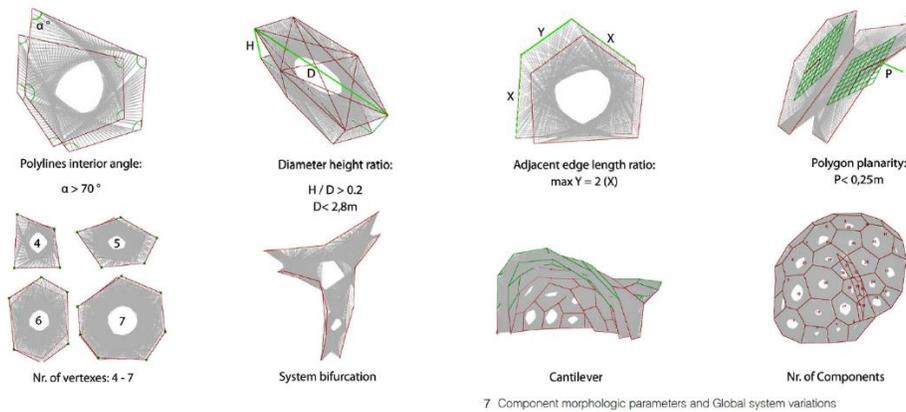


Fig. 50. Pabellón 2013-14. Proceso de fabricación, gráfica.

La configuración de fabricación requiere un entorno óptimo para la generación del código de devanado y con ello menguar las discrepancias entre los modelos virtuales/físicos que pudieran resultar. Por tal motivo se desarrolló un método constructivo que utiliza 2 robots industriales Kuka KR 210 R3100 de 6 ejes que colaboran para tejer filamentos entre dos efectores de estructura de acero hechos a medida. Mientras que los efectores definen los bordes de cada componente, la geometría final emerge a través de la interacción de las fibras colocadas.

Respecto a la codificación de los procedimientos de devanado robótico, existen tres tipos:

...Estos incluyen el desarrollo de una sintaxis sinuosa, simulación digital de los movimientos robóticos y generación de código de una trayectoria sinuosa robótica.

Un robot se designa como maestro y otro como esclavo. Los robots se sincronizan para desarrollar un sistema cinemático de 12 ejes, asegurando así el acoplamiento del devanado.

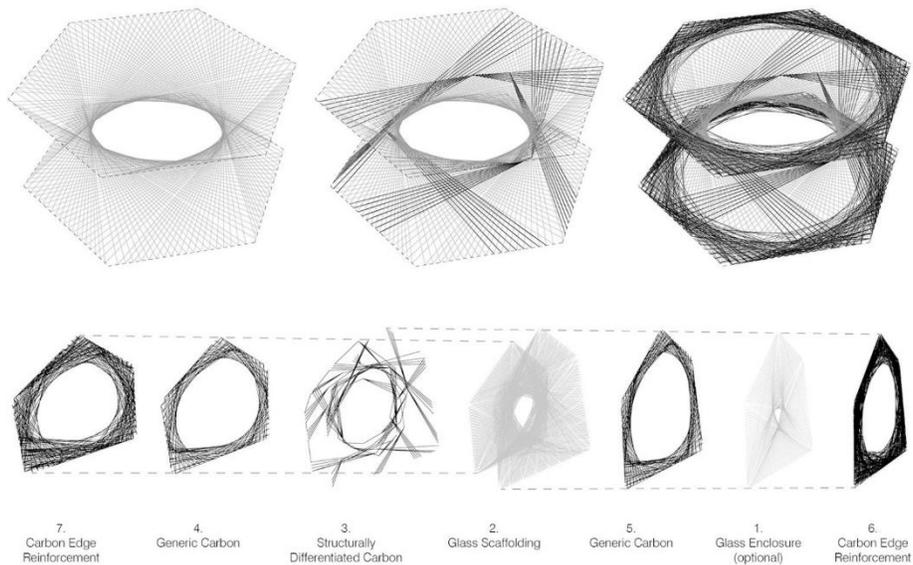


Fig. 51. Pabellón 2013-14. Proceso de devanado de polígonos.

Fueron fabricados 36 elementos individuales, siendo éstos el resultado un sistema de carga de material eficiente, el elemento más grande tiene un diámetro de 2.6 m con un peso de solo 24.1 kg. La estructura cubre un área total de 50 m² y un volumen de 122 m³ con un peso de 593 kg. Para la fabricación de los módulos geoméricamente únicos de doble curvatura, se desarrolló un método de devanado robótico sin núcleo, que utiliza 2 robots industriales de 6 ejes que colaboran para enrollar fibras preimpregnadas en resina, en bases o marcos de acero; éstos fueron diseñados para permitir

ajustes simples y así aumentar aún más el rango de geometrías posibles a partir de un solo marco de bobinado. Los componentes tejidos se unen mediante mangas de aluminio que se integran en el borde de la fibra estructural. Estas fundas se montan en el marco de la bobina antes de que comience el proceso. A medida que se colocan las fibras por el robot, se envuelven alrededor de las mangas de aluminio y se unen permanentemente a ellas curas de resina epoxi.

La ubicación precisa de los mangos de aluminio permite que los componentes adyacentes se unan mediante tornillos de acero los cuales se apretaron a mano debido a la profundidad de los componentes. Las fibras se tensan linealmente entre los dos efectores para posteriormente apoyarse y tensarse entre sí, lo que da como resultado una deformación recíproca. Esta interacción fibra-fibra genera superficies doblemente curvadas a partir de conexiones de fibra depositadas inicialmente rectas.

Como logros técnico-constructivos se puede enfatizar que el pabellón en forma de domo es una expresión arquitectónica única, hiperligera y con recursos maximizados en el cual muros y cubierta se funden en celdas que asemejan una telaraña. Una de las diferencias con respecto a su predecesor es la modularidad y prefabricación de sus elementos constructivos como casetones individuales, ello permite el desarrollo de estructuras tan grandes como sea necesario, las cuales pueden ser extensivas tal como un juego de fichas. ¿Hasta qué punto sería posible acrecentar sus dimensiones? ¿Resultaría viable utilizar esta técnica constructiva en obras con un claro mayor? La transición entre el sistema edificatorio en cada pabellón hasta alcanzar su máximo posible respecto al claro cubierto con el mínimo material es la premisa de diseño. A medida que aumentan las

dimensiones, también incrementan los costos, el trabajo y se asumen nuevos desafíos arquitectónicos, ingenieriles, etc.

En promedio, los componentes variaron de 0.5 a 3 m de diámetro, tuvieron una altura estructural entre 0.38 y 1.23 m. y un tiempo de bobinado entre 8 y 16 h. Dependiendo del tamaño del componente y del refuerzo, se utilizaron de 2 a 5 km de hilos de fibra. La complejidad varió de 8 a 14 vértices por componente.

Fabricación aéreo-robótica: tejido multicapa para membrana monocasco en cantiliver

El despliegue de herramientas novedosas para el diseño computacional y la implementación de vehículos aéreos no tripulados (UAV) dedicados a construir, ha inaugurado un campo de investigación: la fabricación robótica aérea. Propaga el trabajo de brazos robóticos estacionarios, de maquinaria CNC con los aero efectores. Por tal, es necesario el trabajo colaborativo e interdisciplinario. Esta técnica ofrece un panorama sobre la incorporación tecnológica, a la vez que plantea las posibilidades y problemáticas que inciden en su uso y desarrollo.

Si bien la arquitectura logró implementar hasta hace muy poco tiempo sistemas constructivos robótico-computacionales mediante máquinas voladoras, el anhelo del hombre por volar ha estado presente en la historia por lo menos desde hace 500 años; como prueba testimonial se encuentran las propuestas especulativas de da Vinci en la Italia del cinquecento, al amparo de ello el ornitóptero es una de las representaciones más icónicas al respecto.

El S. XX y sus ideales utópicos ligados a la cultura de los vertiginosos avances tecnológicos favorecieron indudablemente la conquista del cielo por el hombre en términos de transporte aéreo. Su afianzamiento, logrado en menos de un siglo y la fascinación de los arquitectos por este escenario - más allá de la transportación - propició un clima de visiones futuristas en las que algunos de sus protagonistas tales como Archigram, Gueorqui Krútikov, Yona Friedman o Wilhelm Holzbauer realizaron propuestas gráficas en el espacio aéreo. Estos planteamientos de ensoñación basados en panoramas que auguraban un posible futuro, presagiaron que los

desarrollos teco-científicos facultarían nuevas metodologías de diseño y construcción imposibles de llevarse a cabo mediante máquinas y herramientas convencionales. La carencia de equipo instrumental y metodologías adecuadas resultarían fundamentales para comprender por qué no fue posible materializar físicamente dichas propuestas.

Ya en el S. XXI, el reiterativo tema en el cual se divisa al cielo como un espacio totalmente construible, así como los desarrollos tecnológicos que incluyen la progresión computacional, la aparición de drones y una reinterpretación de las propuestas enunciadas con anterioridad, se han encausado en propuestas para construir al vuelo.

Fabricación robótica aérea

Las herramientas tradicionales para edificar se encuentran comúnmente a nivel de piso, llámese grúas, revolvedoras, excavadoras, mezcladoras e incluso maquinaria CNC y brazos robóticos. En aras de expandir su campo de acción, éstos han escalado su desarrollo hacia entornos aéreos a través de máquinas robóticas voladoras. Su rango y facultades de desempeño desafían la manera convencional de diseñar y construir.

El periodo tecnológico actual ha suplantado velozmente determinadas tareas manuales/mecánicas por procedimientos robotizados. Recientemente un grupo de investigadores de la Escuela Técnica de Stuttgart, liderado por Achim Menges, así como de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich (ETH) bajo el cobijo de los arquitectos Gramazio & Kholer, han propuesto migrar hacia metodologías edificatorias aéreo-robotizadas. En virtud de ello se han decantado por el uso de cuadricópteros - vehículos aéreos no

tripulados con 4 rotores para sus sostén y propulsión - para fabricar experimentalmente prototipos arquitectónicos que van desde un pequeño pabellón de ladrillos, hasta una membrana tejida al vuelo con fibras poliméricas de vidrio y carbono.

La fabricación aérea consiste en vehículos autónomos voladores capaces de diversificar, complementar y aventajar procedimientos constructivos tanto humanos como de los brazos robóticos industriales terrestres. Su uso implica la interacción y sincronización entre humano/UAV, UAV/UAV, UAV/brazo robótico, UAV/maquinaria CNC y sus posibles combinaciones. Uno de los cambios más radicales al respecto se refiere al control computacional de la construcción y a la libertad de movimiento que ofrecen dichas máquinas:

Dado que el espacio aéreo se había vuelto direccionable por coordenadas y, por lo tanto, parte del mundo racional, el espacio mismo se convirtió en un territorio construible por medio del control digital. Usando máquinas voladoras ultraligeras que se han desprendido del cuerpo masivo, el firme estándar y las restricciones cinéticas de un brazo robótico, fue en este punto que el medio principal de la arquitectura, el espacio, dejó de depender del suelo desde donde se construye la arquitectura.¹³⁵

La construcción robotizada al vuelo requiere una serie de mandamientos tales como interiores controlados respecto al flujo de aire, planificación de trayectorias, una coordinación exacta entre los vehículos voladores,

¹³⁵ Jan Willmann et al. "Aerial robotic construction towards a new field of Architectural research". *International journal of architectural computing*, issue 03, volume 10, (1012): 441, doi: <https://doi.org/10.1260/1478-0771.10.3.439>

precisión industrial para deponer el material constructivo, fidelidad entre los comandos computacionales y los UAV con sus pares terrestres, asignación de tipos particulares de secuencias de ensamblaje, así como predicción de posibles fallas. Sin embargo, el tema clave resulta ser la capacidad de carga útil.

Devanado aéreo-robótico de filamentos sin núcleo

Recientemente la UTS, a través de The Institute for Computational Design and Construction (ICD) en conjunto con The Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE) reformularon el devanado robótico de filamentos sin núcleo (Coreless Filament Winding, CFW) para ejecutarlo con el uso de un vehículo aéreo no tripulado y dos brazos robóticos estacionarios. Esta nueva lógica de fabricación dio pauta para la creación del Pabellón ICD/ITKE 2016-17, una membrana anticlástica en cantiliver, la cual ha sido generada a través de una metodología de diseño y fabricación experimental, pero con amplias posibilidades de migrar hacia otras escalas y tipologías.



Fig. 52. Pabellón ICD/ ITKE 2016-17

La encomienda era desarrollar una técnica de fabricación bio inspirada, que se extendiera más allá del alcance de los robots industriales estacionarios para acoplarse con un UAV en un proceso de fabricación colaborativa. Para dicha causa, la máquina voladora fue adaptada por el propio equipo para cumplir tareas específicas que le serían asignadas y que ninguna otra lograba llevar a cabo hasta ese momento, tales como entretejer material entre dos entornos de fabricación independientes que contenían cada uno un robot industrial de posición fija.

La incorporación paulatina y sesgada de materiales hasta hace poco tiempo ajenos a la arquitectura como son las fibras poliméricas de carbono (CFRP, filamentos negros con un diámetro aproximado de 0.0005-0.010 mm - hechos de átomos de carbono, con una alta relación fuerza / peso, así como una elevada resistencia a la fatiga y a la corrosión.) y vidrio (GFRP, fibras translúcidas basados en dióxido de silicio SiO₂.) ha posibilitado el desarrollo de sistemas edificatorios emergentes, los cuales encuentran un sincretismo entre los dominios robótico-computacional.

La investigación se centró en la simulación de geometrías enrollables, modelado estructural y el proceso técnico de devanado aéreo-robótico, así como en las facultades arquitectónicas en términos de rendimiento material, desempeño estructural, autonomía geométrica, eficiencia de recursos, ligereza y modularidad, así como un novedoso repertorio morfológico inherente a dichas fibras. El proyecto propone prescindir de encofrados, garantizar la accesibilidad de todos los puntos de anclaje, minimizar las colisiones de las fibras recientemente incorporadas con la estructura preexistente creando una sintaxis viable para la fibra que generó la geometría de la superficie.

El desarrollo del proyecto se codifica mediante cuatro áreas de trabajo: ingeniería de materiales, biología sintética, diseño computacional, así como manufactura aéreo-robótica, todas bajo el cobijo de la arquitectura. La fabricación aérea con FRP bio inspirada podría allanar el camino para estructuras más fuertes, más ligeras y de mayor tamaño.

La sinergia entre CFW y los cuadricópteros desafía las condiciones respecto a cómo se diseña y materializa la arquitectura. El desarrollo

de métodos y técnicas de construcción con máquinas voladoras conlleva a cuestionarnos: ¿Cuáles son los potenciales de la conjunción entre CFW, UAV y biomiméesis? ¿Cómo se construye con un material amorfo prescindiendo de un encofrado convencional?

Las posibilidades constructivas que ofrecen estos materiales compuestos no forman parte del colorario de las técnicas edificatorias en la industria de la construcción. Tal situación obedece entre otras causas, a la poca experiencia en su uso, la falta de conocimiento sobre el material, sus propiedades, limitaciones y alcances, así como la ausencia hasta hace poco de procedimientos de simulación y de códigos constructivos. Ello ralentiza una implementación exitosa en el campo arquitectónico.

Proceso de diseño

El estudio y comprensión de los sistemas estructurales compuestos de fibra en la naturaleza, particularmente de 2 especies de polilla minadoras de hojas del filo taxonómico de los Elytros, *Lyonetia clerkella* y *Leucoptera erythrinella*, proporcionó la pauta para la transferencia de determinadas características del modelo biológico al orden arquitectónico. Estas polillas tejen hojas con su seda a manera de hamacas y luego utilizan la geometría resultante para crear su capullo. El proceso de enrollado de las hamacas dobla secuencialmente la hoja a la que está unida, reforzando aún más la hamaca a través de esta deformación elástica.

En el caso de nuestra membrana, las fibras de vidrio se enrollaron dentro de una hoja curva para generar la superficie interna de un arco con una sección transversal arqueada, evitando con ello el pandeo de

los bordes por compresión. Su reforzamiento posterior con fibras de carbono completó la porción.

La verificación del modelo estructural se llevó cabo mediante un proceso de As-Built. Para poder relacionar las iteraciones de diseño computacional con la geometría final del pabellón, se utilizó un proceso de topografía iterativa con una MultiStation.

Proceso de fabricación multi-robot

Estas células interactúan como un sistema alternativo unificado capaz de edificar mediante el tejido de urdimbres poliméricas. La configuración de fabricación multi máquina fue llevada a cabo a través de un cuadricóptero (aéreo-robot de baja carga útil y de largo alcance):

Dos sistemas de sensores integrados le permitieron ubicarse en el espacio y así interpretar correctamente los comandos de movimiento: una cámara con obturador con un sistema visual fiducial de etiquetas únicas montada en el techo y un conjunto de un sensor de sonar con una cámara de flujo óptica. Este sistema se eligió sobre el sistema de seguimiento de movimiento (MTS), ya que se utiliza a menudo en la investigación de UAV y la construcción asistida por UAV en entornos de laboratorio, porque no depende del área de trabajo relativamente pequeña de un MTS. Un imán conmutable en la parte inferior del UAV proporciona la capacidad de transportar y liberar el efector de bobinado¹³⁶.

¹³⁶ Felbrich Benjamin et al. “An Integrative Design Process Utilising an Autonomous UAV and Industrial Robots for the Fabrication of Long-Span Composite Structures” *ACADIA, DISCIPLINES + DISRUPTION*, (2017): 251, http://papers.cumincad.org/data/works/att/acadia17_248.pdf



Fig. 53. Pabellón ICD/ ITKE 2016-17. Proceso de devanado multimáquina.

El UAV interactuó con 2 brazos robóticos KUKA KR 210 R3100 Ultra:

...equipados con extensiones de acero para aumentar su alcance, una pinza hidráulica para agarrar el efector de bobinado del UAV y una cámara de infrarrojos (IR) utilizada para sincronizar la ubicación del robot con la posición del UAV y para compensar las precisiones de aterrizaje¹³⁷.

La membrana monocasco de 1 tonelada que cubre un área de 26.5 m² con una longitud de 12 m y un ancho de 2,6 m, inició con una capa fina de fibra de vidrio que sirve como molde de soporte primario, formado así una malla densa con un mínimo material. Dos brazos robóticos fueron colocados en los extremos de la estructura, a la par que un UAV tejió las fibras a través de los puntos diseñados.

La hoja inicial de GFRP se produjo plana en un marco de madera con mangas incrustadas para enrollar capas de fibra y permitir la conexión a la estructura de acero. Los rovings de fibra fueron

¹³⁷ Ibid.

preimpregnados a través de un proceso de infusión de resina (tow-preg) desarrollado por el Instituto de Diseño de Aeronaves de la UTS.

Cabe resaltar que una de las mayores deficiencias en este proyecto fue la poca velocidad y las fallas entre software y hardware, dado que la resina impregnada a los filamentos agregó fricción extra. Ello ralentizó todos los procesos.

A lo largo de la historia, la arquitectura se había mantenido fiel a los materiales convencionales con los que las diversas sociedades han edificado como son la madera, elementos pétreos, térreos, el concreto y el acero, así como a técnicas edificatorias tradicionales, sin embargo, tal situación ha cambiado gracias a las innovaciones en materiales compuestos y a las metodologías de diseño computacional y fabricación robótica.

Los procesos de fabricación aéreo-robótica repercuten en la creación de nuevas geometrías desarrolladas, acaparan una serie de desarrollos sobre el acontecer venidero en la arquitectura, a la vez que muestran el potente e inigualable discurso que la Industria 4.0 promueve, la superación de los cánones preestablecidos de diseño y construcción mediante la informatización y robotización. Esta singular técnica asume nuevos senderos en la arquitectura, poniendo de manifiesto la posibilidad de construir prescindiendo de andamios, grúas y encofrados. Esta metodología apunta a estrategias híbridas, hombre-máquina, máquina-máquina, máquina-material y sus posibles conexiones.

Sin embargo, aun cuando la fabricación aérea genera un nuevo nivel en la aplicación de la robótica y amplía el espectro de las técnicas edificatorias, únicamente un sector minoritario del gremio de la

arquitectura experimenta con estas técnicas emergentes en algunos laboratorios pertenecientes a instituciones de educación superior. Su promoción hacia la industria de la construcción requerirá mandatoriamente un replanteamiento de los formatos académicos de enseñanza/aprendizaje, así como migrar de los trabajos convencionales de albañilería a la artesanía computacional, en este sentido, la especialización de los obreros será clave para evitar el desplazamiento laboral.

Por otro lado, preservar la fidelidad entre el campo virtual y la materialización de la obra es una tarea que debe permanecer como protagonista en los objetivos de los proyectos, por tal motivo, es necesario predeterminedar computacionalmente de manera fidedigna los comportamientos mecánicos y dinámicos de la interacción UAV/brazo robótico terrestre/humano y sus posibles fallos.

La incorporación de esta metodología al sector de la construcción nos impondrá nuevos abordajes en temas ligados a los materiales de construcción en aras de lograr proyectos de mayor ligereza. Migrar del sistema de losa y columna de concreto armado hacia sus pares discretizadas y segmentadas fabricadas al vuelo con fibras poliméricas podrían allanar el camino en el tema de la capacidad de carga útil de estas herramientas.

La carencia de máquinas voladoras con elevada capacidad de carga y alta durabilidad de vuelo aún están por desarrollarse, sin embargo, la instrumentalización y cooperación de un enjambre de robots voladores, con sus pares terrestres y humanos, han posibilitado vislumbrar un motor que reinventa el repertorio constructivo y conduce a reflexionar sobre qué cambios necesitamos en el diseño y construcción en el lenguaje expresivo actual de la arquitectura.

La adscripción de vehículos aéreos no tripulados en la edificación representa un incipiente tema con un panorama muy alentador. A partir de los elementos y datos revisados es posible considerar que en las particularidades de esta tecnología destacan las siguientes ventajas:

Accesibilidad ilimitada.

La posibilidad de desempeñar otras tareas dentro de la construcción como puede ser la supervisión de obra.

Finalmente, esta metodología goza también de perspectivas futuras inciertas ya que es un tema que aun pertenece a un nicho en el ámbito académico científico. Sus áreas de oportunidad se encuentran en encontrar un balance apropiado con respecto a la capacidad de carga, la suficiencia de vuelo, así como a expandir los procesos experimentales hacia géneros de edificios reales y en meras obras a escala de un pabellón.

Membranas sinclásticas

La elección de materiales tradicionales en la construcción actual, tales como el concreto, acero y/o el ladrillo se debe en parte a la carencia de códigos estructurales y normativas para de materiales como las fibras poliméricas. Aun cuando “estos materiales todavía se esfuerzan por encontrar su lugar en la paleta de materiales de uso típico para la arquitectura”¹³⁸. El desarrollo de procesos edificatorios había permanecido limitado a detalles conectivos, compuestos individuales, encofrados o como materiales embebidos en otro componente.

Recientemente esta situación ha cambiado gracias a ejemplos notables generadas por medio de elementos modulares o monocasco e incluso se han podido desarrollar losas de entrepiso capaces de soportar cargas similares a las del concreto. Tal situación ha logrado la concepción de cualquier clase de superficie incluidas las sinclásticas, también denominadas de curvatura gaussiana positiva, las cuales se refieren a aquellas donde los centros de las curvaturas se encuentran en el mismo lado de la superficie. Las interacciones a un plano perpendicular a dicha superficie producen una línea de interacciones que siempre tiene la concavidad hacia el mismo lado. Las superficies sinclásticas pueden asociarse a diferentes tipos, según sus características, un ejemplo de ello son esferas, bóvedas de traslación, cúpulas e incluso las estructuras neumáticas.

¹³⁸ Niccolò Dambrosio et al, “Buga Fibre Pavilion. Towards an architectural application of novel fiber composite building systems.”, *Conference: Ubiquity and Autonomy - 39th ACADIA* (2019): 141, doi: <https://doi.org/j.ctv13xpsvw.35>

El enfoque de devanado para las fibras se denomina "**enrollado basado en superficie**" y es una metodología para fabricar conjuntos entrelazados de fibras paralelas que se cruzan entre sí, generando superficies locales, entretejidas y estables. Esta nueva técnica ha sido desarrollada progresivamente y exhibida a través de una serie de pabellones efímeros con sus respectivas variaciones al sistema constructivo. Sus empeños se trasladaron en estructuras multicapa de casquete esférico en un cuerpo neumático, demostrando que el uso de CFW es altamente efectivo como sistema estructural. Las investigaciones al respecto se referenciaron en dos obras efímeras, ambas con encofrado inflable neumático ETFE (Membrana de etileno tetrafluoroetileno) que funciona como envolvente:

- **Pabellón ICD / ITKE 2014-15**, una cubierta cupular monocasco de doble capa de fibras poliméricas FRP a compresión.
- **BUGA FIBER Pavilion 2019**, un casquete esférico edificado mediante componentes de fibras poliméricas FRP tubulares.

La membrana de 2014-15, fue la primer estructura sinclástica de estos institutos, dicho proceso dio pauta para profundizar en las costumbres constructivas de la araña de agua *Argyroneta aquatic* como referencia para la **transferencia del modelo biológico a la arquitectura**. ¿Cómo tejen las arañas sus telas? ¿Por qué son tan efectivas bajo situaciones medioambientales extremas?

La identificación de los procedimientos que utiliza la araña para el proceso de construcción de la red que se resuelve en un nido robusto bajo diversas condiciones de contorno. La abstracción de los principios subyacentes dentro de la estrategia de refuerzo de las arañas de agua se basa en los resultados obtenidos a través de la

observación de la formación de burbujas y el comportamiento de refuerzo de fibras de éstas.



Fig. 54. ICD / ITKE 2014-15. Proceso de devanado.

Para su vida subacuática, la araña teje una red colocando haces de seda desde el interior, a manera de bolsa, la cual captura y mantiene aire en dicho entorno hermético. Este proceso fue transferido a una estrategia de fabricación para el refuerzo de fibra adaptado a la carga de un ETFE inflada, para crear una carcasa de compresión resistente a la intemperie sin la necesidad de encofrado adicional.

La araña de agua puede moverse fácilmente, producir y colocar simultáneamente fibras de seda continua en cualquier punto de la burbuja, la configuración de fabricación con un robot de seis ejes en el centro tiene un espacio de trabajo que define el espacio de diseño. Las principales restricciones del robot son tanto su alcance como su primer eje, que no es continuo y permite rotaciones entre -185° y 185° . El rendimiento tanto en el estado inflado, que soporta las fuerzas de tracción durante la fabricación, como en el estado desinflado, que es un sistema de soporte de carga que está sujeto

principalmente a los esfuerzos de compresión debían ser considerados. Cada línea depuesta de haces de fibra fue soldada para evitar colisiones, arrugas y deformaciones plásticas.

Los principios subyacentes del procedimiento de colocación de la seda para la creación de los nidos submarinos, así como el orden de la secuencia constructiva y la disposición jerárquica de las fibras que exhiben características estructurales performativas, fueron exportadas a una metodología para la membrana neumática.

Primero, la araña construye una telaraña horizontal, debajo de la cual se coloca la burbuja de aire. En un paso adicional, la burbuja de aire se refuerza secuencialmente colocando una disposición jerárquica de fibras desde el interior. El resultado es una construcción estable que puede soportar tensiones mecánicas, como el cambio de las corrientes de agua.¹³⁹

El proceso de diseño integral fue fundamental para alcanzar un método de extrusión de fibra continua, llevada a cabo mediante el análisis de elementos finitos, optimizando la disposición y el tamaño de los haces de fibra de carbono para resistir el pandeo utilizando la menor cantidad de material posible:

Similar a la araña, un agente digital navega por la geometría de la carcasa de la superficie generando una ruta de robot propuesta para la colocación de la fibra. El comportamiento del agente se deriva de una variedad de parámetros de diseño interrelacionados. Este proceso de diseño computacional

¹³⁹ achimmenges.net, *ICD/ITKE Research Pavilion 2014-15*, acceso el 07 de febrero 2022, <http://www.achimmenges.net/?p=5814>

permite al diseñador navegar e integrar simultáneamente estos parámetros de diseño en varias orientaciones y densidades de fibra performativas.¹⁴⁰

El **modelo de diseño computacional** se logró debido a análisis estructurales del procedimiento de sintaxis, la tensión de fibras, las propiedades de los sistemas materiales en los cuales, la dirección de los haces de fibras corrían a 60°. Se utilizaron modelos refinados de elementos finitos, en los que estos haces de fibras se modelaron como elementos de viga, considerando las propiedades del material del compuesto, investigadas experimentalmente y probadas, para analizar y optimizar la estabilidad de este sistema de carga primaria, con el objetivo de lograr la máxima rigidez con un peso mínimo.

La **configuración de fabricación** se desarrolló como resultado del estudio biológico; es una película polimérica.

La transferencia de esta secuencia de formación biológica a una técnica constructiva se llevó a cabo a través de una membrana flexible EFTE de 0,2 mm de espesor para el encofrado neumático y la envolvente de construcción terminada en combinación con mechas de carbono, compuesta por 48.000 filamentos preimpregnados con resina epoxi, funciona como un encofrado neumático gracias a sus propiedades mecánicas las cuales minimizan la deformación plástica durante la colocación de la fibra soportada por presión. Esta solución fue tomada debido a factores tales como transparencia, protección contra rayos UV, así como por su buen comportamiento mecánico.

Ello estableció la posibilidad que un robot industrial Kuka KR 120 R3900 de 6 ejes con un efector personalizado, extruyera desde el

¹⁴⁰ Ibid.

centro, de forma iterativa y controlada, fibras poliméricas pre impregnadas de resina desde el interior de la membrana inflada utilizada como molde negativo. Cuando la membrana bajo tensión se refuerza gradualmente, se migra a una capa de compresión compuesta completamente rígida y estable:

Con el fin de reducir la tensión de la fibra al mínimo, se desarrolló un mecanismo de extrusión que desenrolla la longitud exacta de la mecha en relación con la información de tiempo real sobre la velocidad del robot y la longitud de la trayectoria.¹⁴¹

Durante este proceso surgieron 2 desafíos poco predecibles, por un lado, la estabilidad formal/estructural de la membrana después de ser inflada, así como las deflexiones debidas a las cargas de las fibras. La extrusión de las fibras al interior de la membrana corrían el riesgo de colapso debido a la acción gravitacional, para salvar este inconveniente se decantó por la aplicación de un adhesivo compuesto para el amalgamiento de ambos materiales sin afectar las propiedades mecánicas de la matriz polimérica. La deposición del material por la parte interna o en el denominado molde negativo de la membrana hizo un mejor uso del ETFE como elemento de tensión y resultó en menos deflexiones que tuvieron que ser compensadas.

¹⁴¹ Gundula Schieber et al, “Integrated Design and Fabrication Strategies for Fibrous Structures”. *Modelling Behaviour: Design Modelling Symposium* (2015): 240, doi: 10.1007/978-3-319-24208-8_20

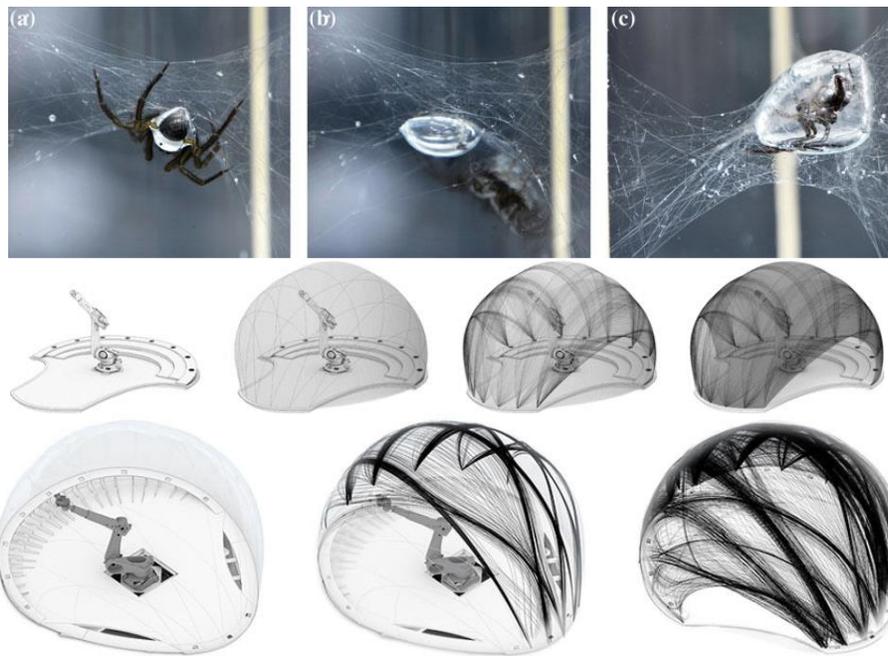


Fig. 55. Araña de agua como modelo análogo de fabricación.

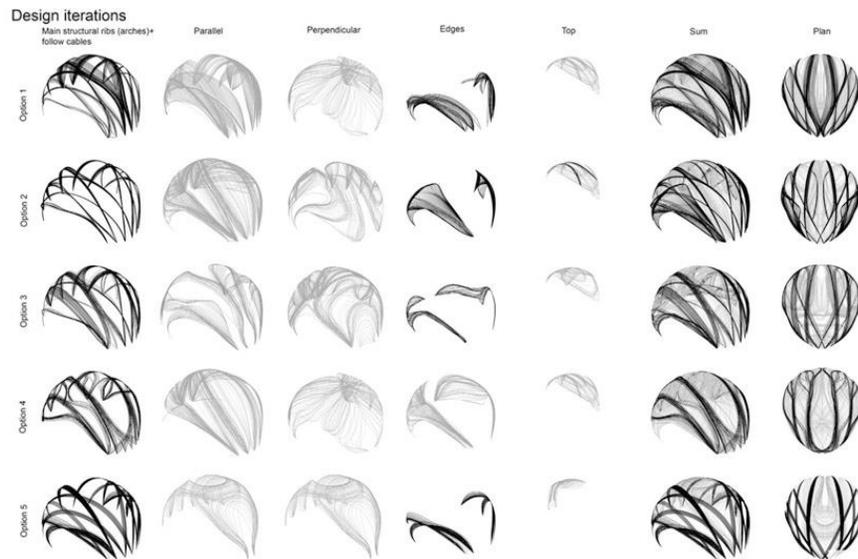


Fig. 56. Diseño iterativo de haces de fibras primarias y secundarias.

Los **logros técnico-constructivos** de este pabellón se retroalimenta entre las condiciones de producción reales y la generación computacional de códigos de control del brazo robótico, pero en un

sentido inverso a la gravedad, es decir las fibras se extruyeron de abajo hacia arriba, formando así la película final. Se empleó un dispositivo de extrusión de fibra activa, que se sincroniza con los movimientos del brazo robótico para deponer la cantidad correcta de fibras.

Compuestos estructurales tubulares para membranas sinclásticas



Fig. 57. BUGA Fiber Pavilion 2019.

La programación computacional del tejido de 150.000 m de urdimbres de filamentos poliméricos y su diseño del proceso de fabricación. Estas redes tejidas revelan aplicaciones arquitectónicas que se alejan incluso de las membranas para adentrarse en aplicaciones arquitectónicas flexibles como la fabricación de elementos constructivos como losas de entrepiso.

La investigación se centra en el desarrollo basado en el diseño conjunto de métodos, procesos y sistemas para edificios de varias plantas, como p. e. edificios residenciales y de oficinas, y representa el alto desafío de integración que se requiere en este contexto. Aquí, el desarrollo de métodos de diseño exploratorio, optimización y análisis, interacción humano-computadora y humano-robot con el apoyo de la realidad aumentada, así como uno integrador gestión de datos en vista de los desafíos particulares de este campo de aplicación arquitectónico, que incluyen controladores de diseño divergentes, parámetros de optimización multidimensional, colaboración humano-robot en la fabricación, modelos y formatos de datos complejos y las diversas perspectivas de las partes interesadas

asociadas, desde el proceso de planificación y construcción a la comercialización y el uso.¹⁴²

Las fibras poliméricas para uso arquitectónico fueron introducidas hace más de medio siglo, - aunque de forma limitada – sin embargo, apenas en la década pasada se detonaron obras con estos materiales. Ello debido al redescubrimiento de sus propiedades mecánicas como una relación de alta resistencia/peso, baja expansión térmica, elevada resistencia a la fatiga y la corrosión. Entre 2018 y 2019, FibR GmbH se asoció con los institutos ICD / ITKE para generar estructuras ultraligeras que trabajen tanto en tensión como en compresión a través de CFW, lo cual implica una extensión morfológica sin límites, con cero desperdicio material. Esta metodología surgió como una variante a los sistemas predecesores, sin embargo, los investigadores aquí se decantaron por la **discretización** mediante estructuras de celosía tubulares huecas en forma de hueso.

Los modelos análogos de esta estructura fueron los procesos previamente probados prototípicamente, es decir se tomó la experiencia de los pretéritos pabellones para ajustar todos los resultados en esta membrana, desarrollando e implementando a mayor escala un sistema de construcción flexible y escalable.

El procedimiento de diseño integral se logró a través de un análisis de FE global para obtener información específica para cada uno de los componentes, que luego se modelan con una disposición de fibra detallada basada en el conjunto de fuerzas recopiladas del modelo global.

¹⁴² Integratives computerbasiertes Planen und Bauen: Architektur digital neu denken

En comparación con los métodos más convencionales de fabricación de FRP, esta técnica reemplaza los moldes con elementos lineales equipados con pasadores de enrollamiento (o puntos de anclaje). Las fibras son enganchadas a los pasadores y los componentes activos de la superficie emergen de la interacción de abarcar fibras de formas libres a medida que el efector las despliega progresivamente en el sistema. Las expectativas en esta estructura fueron superiores a todas las anteriores, ya que esta superficie esférica dado su simetría radial y el método de subdivisión geodésica, permitió salvar un claro mucho mayor a la vez que se redujo significativamente el número de componentes.

Las verificaciones finales del diseño se basaron en pruebas estructurales de acierto/error. Respecto al procedimiento de sintaxis, las fibras de vidrio se utilizan para generar una superficie inicial, sobre la que se proyecta la capa de fibra de carbono para cumplir con los requisitos tanto estructurales como estéticos y se calibra la curvatura con prototipos físicos. Se utiliza la geodésica de la curva que conecta los pasadores de bobinado.



Fig. 58. BUGA Fiber Pavilion 2019, vistas.

Cada uno de los revestimientos de fibra se dimensionó para obtener una resistencia al pandeo comparable, además, se evaluó la

resistencia a la flexión de cada una de estas sintaxis. Una vez que los modelos fueron dimensionados para compresión, los momentos de flexión en una dirección se incrementaron gradualmente, manteniendo la fuerza de compresión hasta encontrar los límites en esa dirección en los que la simulación de EF no convergería por falla de pandeo.

A partir de este estudio, se dimensionó el anillo de borde de los componentes con un diámetro de 15 mm, asegurando la transferencia de fuerzas y evitando fallas en los nudos conectivos, hecho que luego se comprobó con la prueba estructural destructiva de nudos.¹⁴³

Para esta cúpula nervada, el efector trabajó con 149 km de fibra aproximadamente en una disposición espacial mediante la cual el tipo y la densidad de la fibra se podían variar en función de las cargas estructurales. Como en todas las membranas anteriores, las fibras de carbono visten a las fibras de vidrio, en este caso formando las geometrías tubulares que se asemejan a los tejidos musculares flexionados, características del proyecto. La morfología generada gradualmente surge de la interacción a medida de estos haces de fibras, las cuales son tejidos progresivamente por un brazo robótico alrededor de pasadores de anclaje.

Metodología de discretización

Con el fin de mejorar la fabricación, se realizó una racionalización con el fin de minimizar la cantidad de piezas únicas, aplicando una lógica de subdivisión geodésica a un casquete esférico que se modifica topográficamente para producir una teselación en forma de diamante.

¹⁴³ Ibid.

Un total de 60 componentes modulares de vidrio y fibra de carbono con una forma similar a un hueso se dispusieron espacialmente para formar esta cúpula. Una membrana de etileno tetrafluoroetileno (ETFE) tensada por un conjunto de cables se conecta a cada nodo de intersección de componentes y se utiliza como revestimiento. Los componentes se racionalizan en siete geometrías diferentes que se reflejan para producir una quinta parte del espacio semiesférico, repetido para completar la disposición de los 60 elementos.¹⁴⁴

Este método resulta en 5 sectores idénticos de 12 componentes: 7 tipos diferentes y 5 simétricos de espejo, lo que permite la fabricación de la estructura utilizando solo siete conjuntos de marcos de contorno. Ello condujo finalmente a una estructura de domo que se extiende a lo largo de 23 m, alcanzando hasta 7 m en su punto más alto.

El proceso de discretización o el diseño modular de la membrana se logró mediante 6 tipos de componentes, los cuales finalmente serían agrupados por su geometría y ubicación en el domo. El pabellón se compone de una membrana ETFE pretensada y transparente como piel de este casquete de domo autoportante se conforma por 8 marcos estructurales, 60 elementos prefabricados de geometría tubular, con más de 15,000 m de fibras de carbono y vidrio, de 12 tipos (7 tipos únicos más 5 espejos), con un peso aproximado de 7.6 kg/m² cada uno, cubre un claro de 23m, alcanza en su cénit los 7m y abarca una superficie de 400 m².

Mediante el uso de componentes tubulares, los pasadores de enrollamiento están ubicados únicamente en los dos extremos del elemento y dispuestos en el espacio a lo largo de las curvas límite

¹⁴⁴ Gil Pérez, “Structural design assisted by testing for modular coreless filament-wound composites”, 2.

definidas por el diseño. La complejidad del marco de enrollamiento y la cantidad total de puntos de anclaje se reducen luego, lo que resulta en un proceso de fabricación más eficiente para elementos de construcción reforzados con fibra fabricados robóticamente a gran escala, con una nueva tipología geométrica.



Fig. 59. Optimización estructural y racionalización del domo compuesto de fibra BUGA.

Los componentes se conectan en los nodos mediante piezas de acero fabricadas a medida. La topología geométrica del BUGA Fiber Pavilion definida por los diseñadores, está dominada por el uso de cuadriláteros. Los bordes de los cuadriláteros (cuadrícula) se ejecutan como miembros estructurales. Una cuadrícula como en este diseño se puede estabilizar de tres maneras: debe estar arriostrada con una cuadrícula de cables, triangulada con miembros adicionales o los miembros de la cuadrícula deben actuar en flexión. Sin embargo, la triangulación o una cuadrícula de arriostramiento para el diseño se consideraron indeseables y, por lo tanto, todos los componentes se sometieron a momentos de flexión en los nodos de la cuadrícula.¹⁴⁵

¹⁴⁵ Bas Rongen et al, “Structural optimization and rationalization of the BUGA fibre composite dome”. *Proceedings of the IASS Annual Symposium. Structural Membranes* (2019): 3, <https://doi.org/10.1177/0956059920961778>

La **configuración de fabricación** de los componentes de geometría tubular del casquete, fueron depuestos por un efector mediante un proceso aditivo. Los haces de fibra se entretrejieron entre un par de anillos de acero, dicho proceso inició con las fibras de vidrio como un enfoque sintáctico basado en superficies son la primer sintaxis que se enrolla después del anillo de borde inicial para lograr la densidad requerida de la celosía y tiene que cumplir con requisitos geométricos como la sección transversal y la densidad, derivados de consideraciones estructurales y arquitectónicas y se divide en dos capas. Posteriormente son revestidas por las fibras de carbono en los lugares que estructuralmente son requisitadas, emergiendo así finalmente los cilindroides representativos de esta cúpula.

El marco de bobinado desarrollado durante la fase de creación de prototipo consta de 2 diferentes componentes fijados al tubo de acero que conecta el posicionador horizontal de un eje activo, parte de la configuración de fabricación robótica con su contra- rodamiento.

El desarrollo de sintaxis para elementos compuestos estructurales de gran envergadura significó retos de orden estructural que fueron resueltos a través de rutas de carga y su respectiva sintaxis paramétrica, con ello se logra calcular el número de fibra necesaria para mantener la eficiencia material/estructural requerida.

El devanado entrelazado constituye una mejora significativa con respecto a los enfoques basados en la superficie, como se utilizó en el Pabellón de Investigación ICD / ITKE 2016-17 para crear un cuerpo compuesto, particularmente cuando se usa para componentes de gran envergadura. La tensión ejercida por las fibras ya colocadas en el marco se distribuye de manera más uniforme, lo que genera menos tensión en el material y en última instancia, una menor

deformación del marco durante el enrollado, lo que da como resultado una mayor precisión de la pieza.

Continuando con esta secuencia, después de alcanzar una circunvolución, ambos marcos se dividen en partes iguales. La lógica llenará los puntos vacíos de bobinado y creará la celosía completa. Para comprender la interacción y la deformación recíproca de múltiples fibras, se incorpora al flujo de trabajo de diseño computacional una nueva herramienta de simulación de interacción de fibras, desarrollada conjuntamente por ICD e ITKE.¹⁴⁶

Para el correcto funcionamiento, resistencia y calibración estructural de los elementos tubulares y sus nodos, se realizaron pruebas destructivas a gran escala a nivel componente y global.

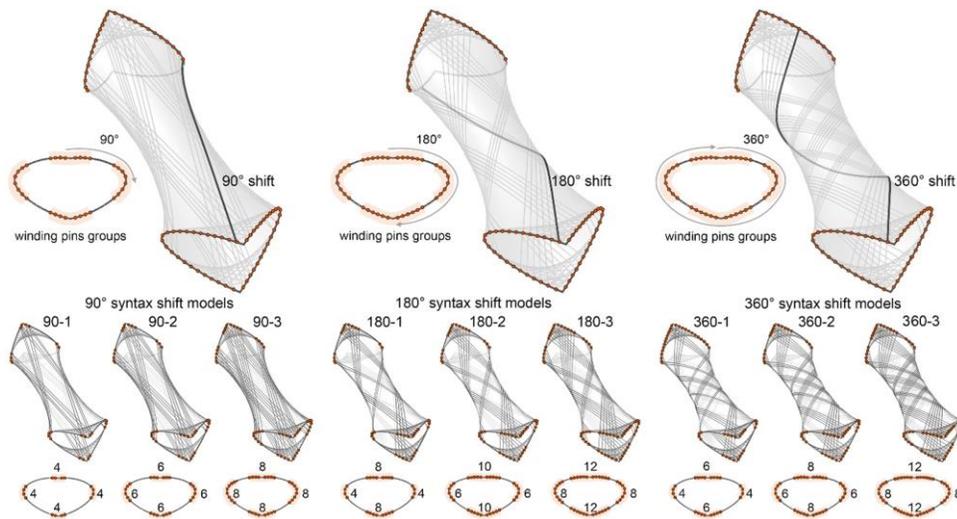


Fig. 60. Elementos tubulares, syntaxis.

¹⁴⁶ Christoph Zechmeister et al, “Design for Long-Span Core-Less Wound, Structural Composite Building Elements”. *Impact: Design With All Senses* (2020): 14, doi: 10.1007/978-3-030-29829-6_32

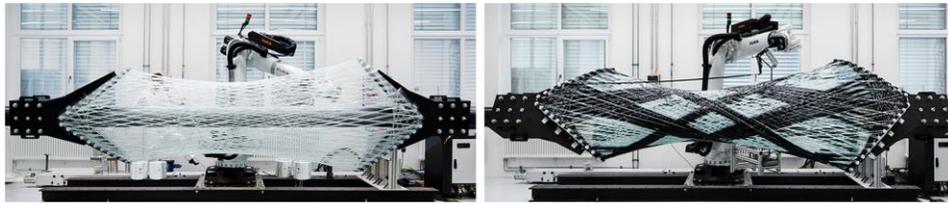


Fig. 61. The BUGA Fibre Pavilion, proceso de devanado.

Como parte de los **logros técnico-constructivos**, los procesos de diseño y fabricación fueron clasificados en 5 postulados, cada uno de ellos representa un punto de inflexión único como parte de un todo y al concluir estos pasos se materializa una obra arquitectónica nueva con la misma técnica constructiva.

1. Conocimiento constructivo

- . Sistema fibroso en biología
- . Materiales fibrosos en tecnología
- . Fabricación fibrosa en tecnología con un enfoque en los procesos avanzados de fabricación para compuestos reforzados con fibra.
- . Sistema fibroso en arquitectura desde proyectos históricos y de vanguardia y experimentos
- . Sistema fibroso en investigación de diseño experimental para proyectos y proyectos especulativos innovadores de puesta a tierra

2. Diseño simultáneo de sintaxis y desarrollo de sistemas de materiales

3. Morfología fibrosa espacial

4. Potencial espacial, estructural y tectónico del prototipo de morfología fibrosa

5. Proto Morfología fibrosa arquitectónica

Este sistema constructivo trae consigo incógnitas respecto a la urgencia de un eurocódigo constructivo para membranas con CFW. Aunado a ello, el desarrollo de futuras técnicas requerirá además de ampliar áreas de

investigación y colaboración en término hasta ahora descartados como son los cerramientos, aislamiento térmico, ventilación, etc.

Los procesos de tejido y/o modelado con estas fibras de alto rendimiento repercuten en la creación de nuevas geometrías edificadas con los supuestos materiales del mañana. La optimización ha llegado a tal grado, que es posible diseñar, calcular y construir losas con alta capacidad de carga y un peso mínimo con fibras poliméricas. Por ende, la etapa en la que estos materiales eran embebidos en otros para su uso óptimo ha concluido.

Desafortunadamente la premeditada analogía de las fibras poliméricas de vidrio y carbono como el nuevo acero del S.XXI es poco probable, ya que por supuesto existen desventajas en el uso de estas fibras para arquitectura. Las posturas detractoras se refieren al elevado costo tanto en términos ambientales como de producción, ya que los filamentos de carbono, como recursos no renovables representan un detrimento.

Si bien nos encontramos en un periodo transitivo hacia un futuro constructivo más sostenible, es un hecho que se debe repensar el uso de estos filamentos para procesos constructivos robotizados. Una alternativa viable y eficiente en recursos a los métodos de construcción CFRP es el pabellón LIVMATS, completamente hecho de fibras de lino.

En tanto que las técnicas robotizadas de fibras poliméricas gozan de las investigaciones de ICD / ITKE y sus respectivos líderes, resulta innegable la necesidad de figuras emblemáticas como las que tuvo el S.XIX representadas en Henry Bessemer y Andrew Carnegie.

Conclusión

La demanda por la construcción de nuevos espacios conlleva retos medioambientales por subsanar. El desmedido uso del concreto armado ha posibilitado que un sector ensaye con materiales como las fibras poliméricas de vidrio y carbono como sustitutos viables de los convencionales compuestos de la construcción. Después de un largo andar experimental con una serie de proyectos arquitectónicos a través de CFW, en los cuales se han logrado desde pequeños casquetes semiesféricos hasta una cúpula mediante secciones tubulares tejidas y con todas las ventajas que resultan del uso de estas fibras poliméricas, su carácter de recurso no renovable ha encausado a mirar hacia una arquitectura con materiales de menor impacto ambiental. De esta manera, la incursión de fibras naturales, vegetales o de base biológica como sustituto de las fibras sintéticas es un tema crucial en la construcción para alcanzar una huella de carbono lo más cercana a cero.

Aun cuando en biología la mayoría de las estructuras de carga son compuestos de fibra y las estructuras tejidas aquí analizadas imitan sistemas biológicos que simulan telas de arañas o sus capullos y la sintaxis de su devanado aumenta sustancialmente sus límites constructivos, no se conforman a partir de celulosa, quitina o colágeno ni de ningún tipo de base biológica. Esto conlleva que estos sistemas fibrosos aun cuando fomentan la eficiencia material no lo hacen de la misma manera con la sostenibilidad.

Así bien, resultan menos contaminante los sistemas de entresijos de concreto armado enriquecido con estas fibras. Sin embargo, dichas fibras podrían sustituirse con otras de base biológica como fibra de yute, lino, sisal, la fibra de coco o el ramio, las cuales son renovables de forma natural, biodegradables, capturan CO₂ durante su crecimiento, su cosecha requiere menos energía renovable que las fibras poliméricas, etc.

De cara al futuro inmediato, la habilitación entre la combinación novedosa de materiales naturales, tecnologías computacionales y manufactura robotizada, es decir, biocompuestos para CFW así como su matriz de resina epoxi de base biológica suponen ventajas sobre las fibras poliméricas. En este sentido, las biofibras (polímero de celulosa) que aparentan una arquitectura vernácula, poseen propiedades mecánicas similares a las sintéticas pero presentan inconvenientes respecto a la inflamabilidad, así como a la humedad propia de las fibras vegetales, ello merma la estabilidad estructural del proyecto final.

Los materiales anisótropicos y amorfos que molden a estos armazones anticlásticos son capaces de establecer interacciones con otros sistemas constructivos, entre tanto, estas técnicas textiles de fabricación pueden establecerse como partícipes o subsistemas en membranas neumáticas, como nervaduras revestidas con una membrana de ETFE transparente, pero también poseen la suficiente capacidad estructural para cargar losas de entrepiso.

Por consiguiente, se conjunta la arquitectura, la ingeniería, la biología con la robótica para dar pauta, a través de elementos de construcción modulares a prototipos arquitectónicos con compuestos con una relación de resistencia y peso muy alta, baja expansión térmica, altas deformaciones por fatiga y resistencia a la corrosión.

Consideraciones finales

Este texto se construyó como un ideario no solo para el registro de proyectos emblemáticos sincrónicos sino del análisis de técnicas de fabricación heterogéneas y conceptuales efectuadas bajo prácticas robótico/computacionales las cuales corrompen los paradigmas bajo los cuales se rigió hasta hace muy poco tiempo la praxis arquitectónica. Estos sistemas de fabricación se aglutinan como una visión conjunta y secuencial que conforma un espectro tendencioso y emergente de un parque edilicio cohesionado en los primeros 20 años de este siglo.

Bajo esta mirada subyace el declive acelerado de las prácticas de diseño, tal situación se ha encausado en la eclosión y proliferación de otros métodos definidos por modelos de industrias periféricas. En cambio, los mecanismos constructivos alternativos también influenciados por profesiones lindantes, específicamente de la industria automotriz no se han caracterizado hasta este punto de la historia de la construcción por su carácter gremial popular. En esta conjunción, las filiaciones han implosionado en un mercado de nicho, pero potencialmente más productivo y beneficioso para nuestra industria.

Poco antes del fin de milenio, las entonces vanguardias digitales anunciaban una serie de revolucionarias ideas arquitectónicas impregnadas de avances tecnocientíficos que sin embargo, se mantenían enclaustradas en la gráfica más que las construcción. Durante estas últimas tres décadas, los vaticinios emprendidos por arquitectos deconstructivistas tan disimiles como Peter Eisenmann, Bernard Tschumi, Gehry, Zaha Hadid, la cooperativa Coop Himmelb(l)au y críticos como Mario Carpo o Antoione Picon mutaron drásticamente hacia el despliegue de una serie de metodologías proyectuales/constructivas de procesos arbitrarios morfológicamente, los cuales les proporcionaron la posibilidad, desde

condiciones poco intelectualizadas y fundamentadas teóricamente, de instaurar un nuevo lenguaje parametricista.

Contrario a ello, las técnicas aquí analizadas se han producido desde un pensamiento tecnocientífico lúcido, un entorno edificado con proyectos de continuidad, (aunque en algunas ocasiones con un alto grado de ambigüedad), con un profundo discurso constructivo topológico auspiciado en obras temporales.

La inevitable conjugación entre procesos tecnológicos y fases creativas se han alineado en este nuevo periodo de científicidad en la arquitectura. Este amalgamamiento que juega un rol protagónico ha dado pauta a la transmutación de las técnicas de fabricación debido al acercamiento, desde luego con los adelantos tecnológicos, pero también con los de índole científico. Reyner Banham lo definió como estética científica cuando editaba la revista *The Architectural Review* en 1960.

Ciertamente, la historia de la construcción se ha caracterizado por buscar soluciones a las nuevas necesidades de fabricación y no queda duda que los adelantos tecnocientíficos son indispensables en este quehacer. De esta manera, el progreso respecto a los mecanismos computacionales y su plena incorporación en la arquitectura se amalgamó a lo largo de la primer década del S. XXI. Durante este proceso heterogéneo, se ha enraizado singularmente la utilización de softwares como metodología de diseño, aunque su uso desmedido es un tema habitual en casi cualquier proyecto contemporáneo.

Claramente los programas de diseño computacional han permeado en todos los despachos, escuelas y arquitectos del mundo, pero contrariamente, hasta el momento ha sido poca la permeabilidad de herramientas más allá de la maquinaria CNC. La evocación reiterada a proyectos formalistas

parametricistas carentes de argumentos morfológico/constructivos, representan la consecuencia de la creciente importancia de la formalidad vacua.

Mucho se ha escrito sobre la digitalización en el campo arquitectónico, poco menos respecto a los alcances de lo computacional en la disciplina, pero aún menos sobre las consecuencias de la robotización de las técnicas constructivas. La edificación mediante procesos robóticos ha expandido las fronteras de las formas ortogonales para ahondar en el desarrollo de morfologías dinámicas omnipresentes en los proyectos aquí revisados.

Debido el profundo interés por proyectos arquitectónicos que resarzan las preocupaciones ambientales sobre el cambio climático y contribuyan a la sustentabilidad, la metodología robótico/computacional ha cobrado un impulso enorme pero segmentario, dichas prácticas reformadoras se han contenido en una estrecha asociación entre desarrollos tecnológicos y el poder adquisitivo. Por tal, es urgente una conexión más cercana entre las sucesivas prácticas arquitectónicas y las vanguardias en maquinaria.

El nacimiento de la segunda década del S. XXI cimentó la idea de la transdisciplinariedad. Las contribuciones de un piélago de profesionistas ajenos a nuestro oficio, aunque de campos complementarios como son ingenieros, biólogos, programadores, científicos de materiales, entre otros más, han logrado forjar un campo inédito enrolando a los brazos robóticos dentro de los procesos constructivos en el vasto espectro de la edificación. Valga recalcar que su implementación en determinados proyectos experimentales se ha dado dentro de la academia.

A su vez, en los esfuerzos colectivos de cooperación que han logrado transformar la manera de construir, el papel de la robótica como herramienta de fabricación constituye una vertiente en la cual sus autores

han quedado fascinados por la posible instrumentalización de sus investigaciones y su consagración fuera de la academia como propuestas que constituyen un nuevo lenguaje formal, estructural y desde luego constructivo.

En esta consecuencia tectónica recién germinada, los sistemas derivados del concepto textil en la arquitectura han sido referenciados, por un lado, en la madera como elemento constitutivo que se flexiona, en las urdimbres que se entretajan para lograr dichos elementos tridimensionales, pero también en el encofrado textil para el concreto armado. Todos ellos han sumado factibilidad constructiva bajo una óptica muy elemental en la que se amalgaman aspectos compositivos, estructurales elaborados a partir de una serie de propuestas que contemplan formalidades y estrategias que dotan al corpus arquitectónico contemporáneo de obras emblemáticas. Ello ha propiciado la llegada de un nuevo periodo arquitectónico que basan sus propuestas quizá inconscientemente en las posturas filosóficas semperianas.

La programación computacional permite emular de una manera extraordinariamente fiel todo el gradiente de complejidad geométrica, las formas logradas a través de la fabricación robotizada facultan elementos de alta resolución, en la cual su ornamentación está ligada intrínsecamente con términos topológicos y estructurales. La materialidad robótico/computacional más allá de sus repertorios morfológicos y de la fascinación por la programación de elementos constructivos como losas o columnas, conlleva un nuevo entender de la arquitectura desde su virtualización, representación, simulaciones y materialidad. Conjuntamente, ello dibuja un entorno que se aleja de los conceptos filosóficos de Gilles Deleuze, los cuales fungieron como fundamentos teóricos del nuevo movimiento que se estaba gestando. El despliegue de la manufactura robotizada que difuminan los límites virtuales/materiales, se

han encausado hacia inéditas técnicas constructivas que retoman al ornato, aunque poco distinguible a primera vista, como una consecuencia constructiva-estructural más que decorativa, aun cuando estas nuevas condiciones plásticas son innegables.

Las propuestas arquitectónicas que acompañaron las obras aquí reseñadas constituyen referentes esenciales para comprender el itinerario hacia una nueva metodología de diseño, pero sobre todo edificatoria. Ello evidencia el andar hacia un inédito sendero, en el cual un sector, aunque minoritario, pero sumamente representativo de nuestro gremio ha pautado el nacimiento de nuevas visiones para los sistemas edificatorios. Ubicados en la primer fase de la segunda década de este siglo, dichos proyectos enmarcan una serie de posturas teórico proyectuales las cuales preparan el arribo de metodologías más concordantes con los desarrollos tecno científicos actuales, pero sobre todo con la consecución de obras más plurales, diversas y renovadas que quebrantan las usanzas de proyectación y edificación parametricistas.

Contrariamente con las estrategias de diseño y construcción recientemente abandonadas, estas obras forman parte de un cúmulo de innovaciones no solo arquitectónicas, sino que conjuntamente con una serie de desarrollos en temas como un nuevo abordaje para materiales tradicionales, han renovado con una destreza constructiva única el cartabón de las técnicas vigesimonónicas. Estos proyectos experimentales se sumergen en una faceta fértil de la diversificación de la construcción, supondrá además del desarrollo de un nuevo lenguaje, novedosos regímenes estructurales y de esquemas simbólicos plásticos plurales y originales que han ya quebrantado lo anteriormente ensayado.

Las obras han cumplido cabalmente la encomienda de aportar creaciones de eficiencias morfológico-espaciales, estructurales, de diseño y

fabricación sin parangón en la historia de la arquitectura, con una variedad de soluciones eficaces de cambio, a través de propuestas desde luego, algunas de ellas, perfeccionables. Estos proyectos también han caído en diversos errores con diversos grados de gravedad, fundamentalmente por omisión. Gracias a la libertad creativa ejercida, el manejo de soluciones de confort térmico, acústico, etc.

Estas obras de profundas ambiciones esculturales y de una marcada expresión morfológico/estructural se han sintetizado perfectamente a través de la materialidad robótico/computacional. Sus aportaciones como legado arquitectónico que se constituyen como técnicas aleccionadoras, propuestas innovadoras y poseedoras de una calidad proyectual constructiva única, que han engalanado por sus valores constructivos y su dinamismo morfológico a la producción arquitectónica contemporánea. Los sistemas edificatorios buscan no solo visualizar a la robótica, sino que anhelan su plena incorporación en la industria de la construcción. Estas obras que abanderan el diseño contemporáneo tecno-ecológico ha redefinido significativamente las metodologías constructivas.

La búsqueda de una equiparación entre la aparente exuberancia formalista con el sistema estructural en la plétora de estos fascinantes pabellones ha engrosado las posibilidades constructivas, pero mientras más sofisticadas son las metodologías y herramientas de diseño y fabricación, mayor es la urgencia de reincorporar los materiales tradicionales en aras de codificar una arquitectura eficiente, ligera y discretizada, promovida como parte de un discurso propositivo desde la academia.

De esta manera, es posible definir las metodologías que componen los procesos de diseño y fabricación, así como las morfologías resultantes en este texto. El arribo de estas inéditas estrategias constructivas, expandirán los caminos futuros en aras de la obtención de proyectos arquitectónicos

sostenibles y optimizados, reduciendo costes, tiempos y procesos de producción.

Los proyectos aquí expuestos han establecido teorías sobre cómo deberíamos incorporar los avances tecnocientíficos a la arquitectura para fabricar de manera menos invasiva y más concordante con las preocupaciones medioambientales en la era del Antropoceno, marcada por el profundo impacto de la huella humana. Para subsanar esta particularidad, resulta esencial nuestra capacidad para el mejor aprovechamiento de los materiales de construcción no renovables al tiempo que aumentamos significativamente el uso de recursos renovables en la edificación. Aunque ello supone enormes desafíos para el futuro de la construcción, los medios asequibles deben mejorarse velozmente. Una de los mejores y más cercanas maneras que tenemos es la implementación de la tecnología, así encontrar maneras novedosas para abordar los problemas que representan las obras arquitectónicas actuales.

Como una extensión de las consideraciones automatizadas en la primera parte de esta investigación, las tareas mecanizadas han ascendido a la siguiente etapa en la cual los métodos y procesos de fabricación y construcción se utilizan para alcanzar niveles más elevados de rendimiento, abarcar claros de mayores dimensiones con mucha mayor ligereza a través de conceptos de discretización que facultan nuevas operaciones de reconfiguración geométrica, dando como resultado membranas expresivamente esculturales.

En términos biológicos, la premisa aristotélica “El arte imita a la naturaleza” se ha manifestado intempestivamente en esta última década con los desarrollos robo-biomorfológicos emprendidos por un colectivo transdisciplinar que intenta replicar los recursos morfológicos de ciertos organismos naturales. Estos proyectos son biomiméticos en tanto que se

intenta clonar sus formalidades o por lo menos partes de ellas para llevarlas al ámbito arquitectónico.

Los exoesqueletos de madera y de fibras poliméricas de carbono y vidrio que se suceden en los últimos 10 años, representan el marco de la nueva forma de producir arquitectura. Han llegado a su punto álgido con los casquetes esféricos stuttgartianos. Para ello y en aras de reconocer y valorar determinadas características significativas, los desarrolladores han profundizado sus investigaciones en el lenguaje biológico, de tal manera ha surgido la premisa de diseñar más con menos. Es decir, más diseño con menos material, ello es representado cubriendo cada vez claros mayores con la misma cantidad de material.

Los gradientes en los que se establecen estas nuevas metodologías que aportan obras matéricas están en proceso para constituirse como un peculiar sistema con bases ideológicas sólidas, similitudes estéticas, cometidos conjuntos interdisciplinarios tales como la producción en serie robotizada de elementos disímiles, así como la simbiosis entre arte e industria. Esta nueva utopía arquitectónica se establece bajo toda proporción guardada, como el inicio de una estrategia tan potente, eficaz e icónica como lo realizado, mediante inéditas experiencias pedagógicas por la Bauhaus; o como Chicago, que en un contexto socio económico sumamente prominente instauró a través de nuevos materiales la creación de sistemas constructivos que arrojaron soluciones arquitectónicas verticales únicas.

Apéndice

Pese a que la incursión tecnológica en el diseño arquitectónico en el S. XX desató una serie de pronunciamientos en su contra, los resultados conseguidos en la mecanización del diseño finalmente se consagraron poco tiempo después. El inicio del S. XXI se enmarcó en una etapa de transformaciones, en donde la arquitectura no se mantuvo rezagada, sin embargo, la plena asimilación de la tecnología digital en el diseño no impactó drásticamente en la manera de edificar.

Aún en fase experimental y sin ningún tipo de consolidación, las obras arquitectónicas nacientes de procesos computacionales y fabricación robotizada germinan nuevos procedimientos constructivos y por ende singulares morfologías a través del uso de materiales tradicionales como la madera, el ladrillo, el concreto u otros de poco o nulo uso en arquitectura como los filamentos poliméricos de vidrio y carbono. Este sofisticado pero hegemónico lenguaje arquitectónico robótico computacional ha incentivado los vínculos con geometrías dinámicas sinusoidales.

La era de la computación no está asociada directamente con mecanismos de fabricación robotizada en nuestro país, aun cuando los nuevos medios tecnológicos han cuestionado las maneras de diseñar, representar, simular y construir, éstas han surgido de manera sobresaliente en muy pocos países, excluido México. El almacenamiento de datos, la editabilidad, la modelación 2D de plantas, cortes y fachadas, así como las tareas de automatización son propias de la arquitectura digital proveniente del segundo periodo del S. XX.

Esta situación cambió drásticamente en el S. XXI, los planos migraron hacia visualizaciones tridimensionales con una representación fidedigna exacta, como instrumentos pensados para la mejor y mas fácil visualización y editabilidad. En sus múltiples lecturas se pueden estudiar una variedad

plural como son las instalaciones hidrosanitarias, las estructuras, la cantidad de materiales, etc.

Mientras que la mayoría de los despachos utilizan la virtualidad de la tecnología en sus proyectos para la modelación 3D, la representación en renders hiper realistas y la formalización de sus propuestas, el hecho es que se mantienen embebidos en propuestas gráficas digitales que no recurren a la adscripción de los procesos computacionales para programar su arquitectura. Tal situación es comparable a lo sucedido con las propuestas vigesimonónicas de Archigram y con la obra pictórica más que arquitectónica de Zaha Hadid.

La especulación que esta arquitectura de papel suscita en los arquitectos mexicanos se encausa hacia una tendencia acrecentada por la fácil manipulación de programas de diseño, ello repercute mayoritariamente en enfoques de generación formal parametricista carente de fundamentaciones teórico/constructivas. Este hecho es contrario a lo sucedido con el periodo de arquitectura moderna mexicana, en donde la construcción de una cultura material se llevó a cabo por el mestizaje entre el estilo internacional y la arquitectura connacional. Existió una diversificación de modelos y propuestas arquitectónicas abanderadas por Barragán quien cuestionó la ausencia de identidad mexicana en el estilo internacional. De igual manera, Candela dotó a nuestro país con obras que hoy día reconocemos con una extraordinaria filiación mexicana, las cuales encarnan la búsqueda nacionalista de un progreso y transformación.

Los arquitectos mexicanos y sus obras se mantienen sumergidos en las tradicionales maneras de proyectación y edificación modernistas, aun cuando nuestros pares en Estados Unidos y algunos países de Europa se decantan por innovar en su manera no solo de representación y en sus morfologías, sino en su concepción de la arquitectura. Ante este hecho, es

inegable que la arquitectura mexicana con salvas excepciones se encuentra estancada en los pilares del modernismo internacional; personajes emblemáticos del funcionalismo como Nervi, Le Corbusier Mies Van der Rohe e incluso en mismo Félix Candela son mayoritariamente los ejemplos académicos con los cuales somos instruidos en las universidades.

Si bien estamos en el alba de un nuevo periodo en la historia de la arquitectura y pese a que la disponibilidad de programas de diseño es inmediata, lejos también quedan las propuestas arquitectónicas nacionalistas que se fragüen como proyectos programados computacionalmente y materializados robóticamente.

La arquitectura mexicana no debería ser impasible con la tecnología y la revolución que ésta ha generado. Aún cuando existen FabLabs en universidades nacionales, el campo experimental de la arquitectura robotizada ha permeado en un grupo minoritario de arquitectos en el cual su alcance se limita a procesos de modelación, visualización y diseño, todo ello son series de automatización, pero no de construcción. El caudal de ramificaciones que la tecnología computacional posee debería encausarse no únicamente en los diseños, sino también en variedades materiales, constructivas, estructurales y por tanto formales.

Es indudable que la arquitectura programada despliega patrones singulares con una complejidad geométrica sorprendente, ello ha sido posible en los mejores casos por el replanteamiento de los paradigmas convencionales, los cuales han fomentado un cambio en los procesos de diseño y fabricación. Incluso el propio vocablo de construir se ha sustituido progresivamente por el de fabricar. Los proyectos arquitectónicos se fabrican no se construyen, de la misma manera, éstos se programan no se diseñan.

A medida que la tecnología se expande, también se acrecentan los desafíos de emergencia climática a los que nos enfrentamos, ello compromete a la arquitectura a innovar tanto en sus materiales como en los sistemas de construcción. El crecimiento poblacional desmedido y no planificado que mengua al medioambiente y a los ecosistemas locales, nos enfrenta con el cambio climático y nuestra huella de carbono que como sociedad emitimos.

El mestizaje logrado en el funcionalismo mexicano conlleva para nuestro país el reto de lograr un impulso de fabricación renovador, desde luego influenciado desde el exterior, pero con la premisa de dejar atrás los antiguos cánones constructivos vigesimonónicos que produjo algunas de las obras más representativas de nuestra arquitectura en aras de lograr proyectos más plurales, mediante el manejo de nuevos sistemas de fabricación. Si bien en las universidades de nuestro país se han gestado una serie de acciones para incentivar el uso de la tecnología aplicada a la arquitectura, valga aclarar que la metodología de diseño funcionalista de una rigurosa geometría ortogonal continúa siendo adocrinadora hoy día.

La programación en el diseño arquitectónico se ha convertido en solo una década en un poderoso símbolo de una nueva era, prácticamente desde la primer técnica implantada en el pabellón ICD/ITKE 2010, suscitó la atención de arquitectos e ingenieros y disciplinas afines de todo el orbe. A esta situación contribuyó de manera tácita también el empuje de un dispositivo tecnológico asociado generalmente a la industria automotriz: los brazos robóticos industriales. Es de tal magnitud este singular movimiento que no es exagerado decir que esta simbiosis ha sido el mayor factor de transformación de la arquitectura en su historia.

Sobre las reformas de las que ha sido participe la arquitectura, el sincretismo robótico computacional encontró uno de sus primeros

escenarios en la industria cinematográfica. La fiebre por los novedosos modos de modelar en 3d para posteriormente imprimir objetos a escala mediante maquinaria CNC pronto se expandió hacia nuevos públicos en un segmento poblacional denominado *geeks*.

La democratización de la tecnología se vio aprovechada, aunque muy lentamente por los FabLabs universitarios, esto implantó un cambio forzoso en las miradas hacia las nuevas oportunidades para hacer arquitectura. Ante esta coyuntura se tuvo la ocasión para diseminar entre los alumnos el potente discurso que la impresión 3d trae consigo, además de generar sistemas edificatorios concordantes con los diseños computacionales. Sin embargo, una gran mayoría de arquitectos han insistido en ahondar en sus propias preocupaciones, acogidas en sus postulados unipersonales sin lograr encausar sus investigaciones hacia una colectividad transdisciplinar que faculte la creación de trabajos colaborativos.

Bibliografía

- Agkathis, Asterios.
Arquitectura biomorfica. Diseño orgánico y construcción. Promopress, 2017.
Diseño generativo: procesos para concebir nuevas formas arquitectónicas. Promopress. 2016.
Modular structures in design and architecture. Laurence King Publishing, 2009.
- Banham, Reyner. Megaestructuras. Futuro Urbano del pasado reciente. GG, 2001.
- Bechthold, Martin. Complex shapes in wood: Computer aided design and manufacturing techniques. Tesis doctoral. Harvard University, Cambridge, 2001.
- Beorkrem, Christopher. Material Strategies in Digital Fabrication. Routledge, 2012.
- Borrego Gómez - Pallete, Ignacio. CoLaboratorio 5 – Fabricación digital y arquitecturas colaborativas.
- Broadbent, Geoffrey. Metodología del diseño arquitectónico. GG, 1971.
- Buci-Gluksmann, Christine. Estética de lo efímero. Arena Libros. Madrid, 2010.
- Carbajal Vega, Ana Laura. Creatividad y construcción arquitectónica de vanguardia. Estudio sobre proceso de invención y modelo didáctico de aplicación para el desarrollo creativo en la enseñanza aprendizaje en la introducción en el diseño arquitectónico. Universidad Complutense de Madrid. Tesis doctoral.

- Cifuentes Quin, Camilo Andrés (2014) Narrativas cibernéticas y arquitectura computacional. Tesis doctoral. Director: Joaquín M. Regot Marimón.
- Collins, Peter. Architectural Judgement. McGill-Queen's University Press, 1971.
- Corser, Robert. Fabricating Architecture: Selected Readings in Digital Design and Manufacturing. Princeton Architectural press. <https://bit.ly/2HzS3zB>
- Daas, Mahesh. Towards a Robotic Architecture.
- De la Parra, L. y Camiro, D. 2011. Diseño paramétrico. Metodología y aplicaciones de diseño paramétrico. Chido Studio. <https://bit.ly/2K8GHkw>
- Dollens, Dennis. De lo digital a lo análogo. GG, Barcelona 2002.
- Domínguez Moreno, Luis Ángel. Alvar Aalto. Una arquitectura dialógica. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Frampton, Kenneth. Estudios sobre cultura tectónica. Poéticas de la construcción en la arquitectura de los siglos XIX y XX.
- García del Valle Lajas, Matías. Diseño para fabricación digital definición unívoca entre forma y fabricación en arquitectura. Tesis doctoral. UPM.
- Gilsanz Díaz, Ana. Luces y sombras de los Serpentine Pavilions: Un análisis formal, programático y contextual. Universidad de Alicante.
- Gonca Zeynep, Tunçbilek. Temporary architecture: The Serpentine

Gallery pavilions. Tesis de máster:
<http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12616546/index.pdf>

- González Tejada Ignacio. Guía, proceso y seguimiento de la problemática arquitectónica. Manual para elaborar tesis, trabajos escolares e investigaciones. Limusa – Grupo Noriega editores.

- Gramazio, Fabio and Kohler, Matthias.

The Robotic Touch: How Robots Change Architecture, 2014.

FABRICATE: Negotiating Design and Making. 2014.

Flight Assembled Architecture. Editions Hyx. 2013.

Digital Materiality in Architecture. Lars Müller Publishers. 2008.

- Jerez Abajo, Enrique. El legado de lo efímero: 1937-2010: la arquitectura proyectada y construida de los pabellones de España en las exposiciones Internacionales. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Valladolid, España.

- Jodidio, Philip.

The New Pavilions. Edit. Thames & Hudson.

Serpentine Gallery Pavilions. Taschen. Alemania, 2011. KOCATÜRK,

Tuba and MEDJDOUB, Benachir. Distributed Intelligence In Design.

<https://bit.ly/2qPJAOZ>

- Kottas, Dimitris. Arquitectura digital. Nuevas aplicaciones.

- Krauel, Jacobo. Arquitectura efímera: Innovación y diseño.

- M. Beylerian, George H, Dent Andrew; Moryadas, Anita. Material connexion: the global resource of new and innovative materials for architects, artists and designers. Ed. Thames & Hudson.

- Maturana Humberto y Varela, Francisco. De Máquinas y Seres Vivos. Universidad Santiago de Chile, 1973.

- Maturana, Humberto. Fundamentos Biológicos del Conocimiento. En: La realidad ¿objetiva o construida?, Anthropos, Universidad Iberoamericana, México, 1996.

- Martínez Osorio, Pedro Arturo. El proyecto arquitectónico como un problema de investigación: <https://bit.ly/2Iug7UK>

- Mason, Paul. The end of capitalism has begun: <https://www.theguardian.com/books/2015/jul/17/postcapitalism-end-of-capitalism-begun>

- Maya, Esther. Métodos y técnicas de investigación. Una propuesta ágil para la presentación de trabajos científicos en las áreas de arquitectura, urbanismo y disciplinas afines. UNAM. Facultad de Arquitectura: <https://bit.ly/2nysQcq>

- Menges, Achim.
Computational morphogenesis: <https://bit.ly/2qPKpHy>
Integral Form Generation and Materialization Processes Computational desing thinking. Edit. Wiley, 2011.
Emergent Technologies and Design: Towards a Biological Paradigm for Architecture, 2010. Advancing Wood Architecture: A Computational Approach. Routledge, 2011.

- Monclús, Fedele Javier. Las huellas de lo efímero. Las implicaciones urbanísticas de las expos. Arquitectura Viva: Movimiento Expo. *Las Exposiciones Universales y la Aportación Española*. SEEI, Madrid, 2008.

- Molina Siles, Pedro Javier. La arquitectura efímera: Los pabellones temporales de la Serpentine Gallery como paradigma del proceso creativo. Tesis de Máster. Universidad Politécnica de Valencia: <https://bit.ly/2vyxqit>

- Lynn, Greg. Folding in Architecture.

- Ortega, Lluís. Digitalization takes command: el impacto de las revoluciones de las tecnologías de la información y la comunicación en arquitectura. Tesis doctoral, 2014.

- Otero, Marina. Arquitecturas de circulación y acumulación: El remontaje de los pabellones de la Serpentine Gallery. Pontificia Universidad Católica de Chile.

- Oxman, Rivka y Oxman, Robert. Theories of the Digital in Architecture. Routledge,

- Peters, Terri and Peters, Brady. Inside Smartgeometry: Expanding the Architectural Possibilities of computational design: <https://bit.ly/2Hja8m9>

- Puentes, Moisés. Pabellones de exposición: 100 años. Barcelona: GG, 2000.
- Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018
- Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2017
- Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016
- Rahim, Ali. Catalytic Formations: Architecture and Digital Design. Taylor & Francis.

- Roqueta, Santiago, Fort, Josep M. Arquitectura, art i espai efímer. UPC, Barcelona, 1999.

- Roig Segovia, Eduardo (2014) El Entorno Aumentado: Imperativo informacional para una ecología digital de lo arquitectónico. Tesis doctoral. Directora: Atxu Amann y Alcocer.

- Sanfeliu Arboix, Ignacio. La Arquitectura efímera: los componentes efímeros en la arquitectura. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya.

- Schodek, Daniel; Bechthold y Martin; Griggs. Digital design and manufacturing: CAD / CAM Applications in architecture and design, John Wiley & Sons, Hoboken, 2004.
 - Schumacher, Patrik. La autopoiesis de la arquitectura. John Wiley & Sons 2010.
- The Congeniality of Architecture and Engineering. The future potential and relevance of shell structures in architecture. Published in: Shell Structures for Architecture - Form Finding and Optimization. 2013.
- SHoP (Firm). SHoP Architects: Out of Practice. Kimberly J. Holden, 2010.
 - Steele, James, Arquitectura y revolución digital. Barcelona, GG, 2001.
 - Sullivan, Louis. (1924), A System of Architectural Ornament, Press of the American institute of architects, inc., New York.
 - Viamonte, María Pilar. Arquitecturas efímeras con herramientas paramétricas. Universidad de Zaragoza.
 - Zaera Polo, Alejandro. YA BIEN ENTRADO EL SIGLO XXI ¿LAS ARQUITECTURAS DEL POST-CAPITALISM?

Fuentes hemerográficas

a+t architecture publishers. SOLID Harvard GSD series N°. 45. Design Techniques
 N°. 46. Organization or Design? N°. 47. Interior Matters
Arquine N°. 45. Arquitectura efímera.

Architectural Design AD:

- Volume 89, Issue 5. BEAUTY MATTERS: Human Judgement and the Pursuit of New Beauties in Post-Digital Architecture

- Volume 89, Issue 1. Special Issue: Machine Landscapes: Architectures of the Post- Anthropocene.
- Volume 88, Issue 5. Special Issue: New Modes: Redefining Practice 136 PP. September/October 2018.
- Volume 87, Issue 4. Autonomous Assembly: Designing for a New Era of Collective Construction, 136 PP. July/August.
- Volume 87, Issue 6: 3D-Printed Body Architecture, 136 PP. November/December 2017.
- Volume 86, Issue 2: Parametricism 2.0: Rethinking Architecture's Agenda for the 21st Century, 144 PP. March/April 2016.
- Volume 86, Issue 5: Digital Property: Open-Source Architecture. September/October 2016.
- Volume 86, Issue 6: Evoking Through Design: Contemporary Moods in Architecture. 136PP, November/December 2016.
- Volume 85, Issue 5: Material Synthesis: Fusing the Physical and the Computational, September/October 2015.
- Volume 84, Issue 3: Made by Robots: Challenging Architecture at a Larger Scale. Made by Robots. Challenging Architecture at a Larger Scale. Fabio Gramazio, Matthias Kohler, May/June 2014.
- Volume 84, Issue 4: Future Details of Architecture, July/August 2014.
- Volume 84, Issue 5: Empathic Space: The Computation of Human-Centric Architecture. Guest Editors Christian Derix and Åsmund Izaki, 2014.
- Volume 82, Issue 2: Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design, March/April 2011.
- Volume 83, Issue 2: Computation Works: The Building of Algorithmic Thought, March/April 2013
- Volume 83, Issue 6: The Architecture of Transgression, November/December 2013.
- Volume 80, Issue 4: The New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies, July/August 2010.
- Volume 80, Issue 2: Exuberance: New Virtuosity in Contemporary Architecture, March/April 2010.

Arquitectura Viva:

- Hannover 2000. N.º. 72. Construcciones virtuales y urbanismo sostenible
- Banda ancha. N.º. 124. Obras digitales de la estructura a la piel
- Woven Works. N.º. 174. Woven works
- Espacios efímeros. N.º. 141. Entre la celebración y la innovación. Sanghai 2010. N.º. 129
- Más madera. N.º. 137. Más madera, de la artesanía a la robotización AV

Studio air https://issuu.com/studio_air

Portales web:

- AA School Homepage: <https://www.aaschool.ac.uk/>
- A fasia archzine: <http://afasiaarchzine.com>
- Archdaily: <https://www.archdaily.com/>
- Arqueología del futuro: www.arqueologiadel futuro.blogspot.com
- Arquine: <http://www.arquine.com/>
- Arquitectura viva: <http://www.arquitecturaviva.com>
- Atributos urbanos: <http://atributosurbanos.es/inicio/>
- CNN. Style: <http://edition.cnn.com/style/architecture>
- Designboom: <https://www.designboom.com/search-result/?q=pavilion>
- Dezeen: <https://www.dezeen.com/tag/pavilions-tag/>
- Divisare. Atlas of architecture: <https://divisare.com/>
- Dollens, Dennis. The Tumble Truss Project: www.Tumbletruss.com
- Domus: <https://www.domusweb.it/en/architecture.html>
- Efímeras: <http://www.efimeras.com/>
- EMTECH: <http://emtech.aaschool.ac.uk/>
- El lugar de los sueños. Arquitectura efímera: <https://bit.ly/2Hj3pbA>
- eme3: <http://eme3.org/2016/eme3/historia/>
- Edgar González: <http://www.edgargonzalez.com/>
- Espacio BIM: <https://bit.ly/2HRZ2Bq>
- Experimenta: <https://www.experimenta.es/noticias/arquitectura/>
- Fubiz: <http://www.fubiz.net/en/category/design-en/architecture-en/page/7/>
- Institute for Computational Design and Construction: <http://icd.unistuttgart.de/>
- Loves Domus: <http://loves.domusweb.it/>

- Magaceen: <https://magaceen.com/es/architecture/>
- Metalocus: <https://www.metalocus.es/es/historic?keys=pabellones>
- MIT Technology Review: <https://bit.ly/2EVWdwO>
- MIT ARCHITECTURE: <https://architecture.mit.edu/>
- Patrik Schumacher: <https://www.patrikschumacher.com/index.htm>
- SACYR: <https://bit.ly/2IslmV6>
- San Rocco: <https://www.sanrocco.info/>
- Surface: <https://bit.ly/2F7iZSq>
- Veredes: <https://veredes.es/blog/>
- zhcode: <http://www.zha-code-education.org>

Referencias audiovisuales

- Mario Carpo: "The Second Digital Turn" | Talks at Google:
<https://bit.ly/2HkLdN2>
- The Greg Lynn Show, episode 11: Patrik Schumacher:
<https://bit.ly/2Hn4HAp>
- FREI OTTO: SPANNING THE FUTURE (2014): <https://bit.ly/2zgKdoB>
- Marc Kushner: Por qué los edificios del futuro se ajustarán a...usted:
<https://bit.ly/2PapDRG>
- ZHA KnitCandela Construction Process: <https://bit.ly/2TWkdbJ>
- Buildings Printed by Robots - the Future of Architecture:
<https://bit.ly/2zhuq95>
- The Foundations of Digital Architecture: Peter Eisenman:
<https://bit.ly/2ZsTYyy>
- Achim Menges: Rethinking Materiality Through Computation in
Architecture: <https://bit.ly/2KU2Zcd>
- Carbon fiber advantages in concrete boom pumps: <https://bit.ly/30rQNok>
- The Greg Lynn Show, episode 1: Neil Denar: <https://bit.ly/2Pb7KSz>
- Patrik Schumacher, TECTONISM: <https://bit.ly/2ZsUPiK>
- Advances in Architectural Geometry – MIT: <https://bit.ly/2Pb7YZV>
- Matt Carney | TEDxBeaconStreet: <https://bit.ly/2L318Ra189>
- Patrik Schumacher. Lecture "How to Create Quality Space Using New
Architectural Technologies": <https://bit.ly/30v2EBT>

- The digital world is not crisp. It is porous and diffuse' - Public Debates Digital X 2019: <https://bit.ly/2KU3inn>
- Digital Fabrication Lecture Series: Nader Tehrani: <https://bit.ly/2P7S4zw>
- Revolución Industrial 4.0. Gran documental alemán de DW-TV: <https://bit.ly/2MBkArq>
- Panel Discussion: Toward a Robotic Architecture. NCCR Digital Fabrication: <https://bit.ly/2z11ey1>
- The Construction Robots are Coming | The B1M: <https://bit.ly/2L2Mc1S>
- People will "learn to love" architecture created using technology says Patrick Schumacher: <https://bit.ly/322Zlg3>
- Patrik Schumacher's keynote speech at Dezeen x Grohe's Wave of the Future even: <https://bit.ly/2TXH3zs>

Lista de figuras.

Fig. 1 Alejandro Zaera-Polo y Guillermo Fernandez Abascal. "La brújula política de la arquitectura: una taxonomía de la arquitectura emergente en un diagrama" [Architecture's "Political Compass": A Taxonomy of Emerging Architecture in One Diagram] 15 ene 2017. ArchDaily México. (Trad. Stockins, Isadora) Accedido el 14 Jun 2022. <<https://www.archdaily.mx/mx/802305/la-brujula-politica-de-la-arquitectura-una-taxonomia-de-la-arquitectura-emergente-en-un-diagrama>> ISSN 0719-8914

Fig. 2 Tipos de curvas. Teoría arquitectónica estructural espacial de Gaudí. https://wiki.ead.pucv.cl/Teoría_arquitectónica_estructural_espacial_de_Gaudí

Fig. 3 Nest Hilo, ETH Zürich, 10.12.2017: <https://bit.ly/2mdj16Q> Tomás Méndez Echenagucia et al. A Cable-Net and Fabric Formwork System for the Construction of Concrete Shells: Design, Fabrication and Construction of a Full Scale Prototype. *Structures 18* (2018). DOI: 10.1016/j.istruc.2018.10.004

Fig. 4. Nest Hilo, ETH Zürich,. Tomás Méndez Echenagucia et al. A Cable-Net and Fabric Formwork System for the Construction of Concrete Shells: Design, Fabrication and Construction of a Full Scale Prototype. *Structures 18* (2018). DOI: 10.1016/j.istruc.2018.10.004

Fig. 5. Optimización topológica. 3D-Printed Stay-in-Place Formwork for Topologically Optimized Concrete Slabs, 100

Fig. 6. Losa de concreto Smart slab: <https://www.studioseed.net/blog/software-blog/parametric-generative-design-blog/grasshopper/smart-lab-la-cubierta-de-concreto-mas-eficiente-y-liviana/>

Fig. 7. King's Chapel, Cambridge:
https://live.staticflickr.com/4130/4953858698_81f6b6ddea_b.jpg

Fig. 8. Concrete slab. Fast complexity

Fig. 9. Concrete slab. Fast complexity . Anton Ana, Andrei Jipa, Lex Reiter y Benjamin Dillenburger. Fast Complexity. Additive Manufacturing for Bespoke Concrete Slabs, 236-237.

Fig. 10. Jipa Andrei, Mathias Bernhard, Mania Aghaei Meibodi y Benjamin Dillenburger. "3D-Printed Stay-in-Place Formwork for Topologically Optimized Concrete Slabs, 103-106.

Fig. 11. Smart slab: <https://dbt.arch.ethz.ch/project/smart-slab/>

Fig. 12. dbt. Digital Building Technologies: The Smart Slab:
<http://dbt.arch.ethz.ch/project/smart-slab/>

Fig. 13. 3D-Printed Formwork for Integrated Funicular Concrete Slabs, 6

Fig. 14. Entrada principal a la Exposición Universal de París, el año 1900:
<https://laderasur.com/articulo/el-origen-de-los-naturalistas/foto-2-5/>

Fig. 15. Radiolarios, Haeckel:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Haeckel_Cyrtoidea.jpg

Fig. 16. Perricone Valentina et al. Bioinspir. Biomim. Echinoids in Architecture. Research pavilions and building constructions inspired by both morphological and mechanical principles of the generation Clypeaster and Phyllacantus, 15. (A) ICD/ITKE Research Pavilion 2011. (B) Landesgartenschau Exhibition Hall 2014. (C) ICD/ITKE Research Pavilion 2015–16. (D) BUGA Wood Pavilion 2019.

Fig. 17. Perricone Valentina et. Al. Constructional design of echinoid endoskeleton: main structural components and their potential for biomimetic applications, 7.

Fig. 18. Christoph Gengnagel, Holger Alpermann, Elisa Lafuente Hernández. Active Bending in Hybrid Structures, 3.

Fig. 19. Alessandro Liuti, Carlotta Mazzola Alessandra Zanelli. Where design meets construction: a review of bending active structures, *Proceedings of the IASS Symposium 2018. Creativity in Structural Design.* Caitlin Mueller, Sigrid Adriaenssens (eds.) (MIT, Boston, USA 2018), 2,4.

Fig.20. Metodologías de investigación: Abajo - arriba. Arriba – abajo. En *Biomimetics for Architecture. Learning from Nature*, 11.

Fig. 21. Pabellón ICD / ITKE 2010: <http://www.iaacblog.com/programs/icditke-research-pavilion-2010/>

Fig. 22. <http://www.iaacblog.com/programs/animated-systems-assignment-2-icditke-research-pavilion-2010/>

Fig. 23. Pabellón ICD-ITKE 2015-16: <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/>

Fig. 24. Tobias Schwinn. Robotic Sewing. A Textile Approach Towards the Computational Design and Fabrication of Lightweight Timber Shells, 226.

Fig. 25. Textile Fabrication Techniques for Timber Shells. Elastic Bending of Custom-Laminated Veneer for Segmented Shell Construction Systems

Fig. 26. Torre Urbach. <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/remstal-gartenschau-2019-urbach-turm/>

Fig. 27. Torre Urbach, vistas. <https://link-springer-com.pbidi.unam.mx:2443/content/pdf/10.1007%2F978-3-030-29829-6.pdf>

Fig. 28. Torre Urbach. Modelo arquitectónico.

Fig. 29. Torre Urbach. Modelo estructural.

Lotte Aldinger. Design and Structural Modelling of Surface-Active Timber Structures Made from Curved CLT - Urbach Tower, Remstal Gartenschau 2019. Integrative design framework comprising geometry generation, CLT design, connection detailing, fabrication constraints, and structural design.

Fig. 30. Pabellones ICD / ITKE 2011, LAGA y BUGA respectivamente. Oliver David Krieg: <https://www.oliverdavidkrieg.com/?p=987>

Fig. 31. Anne Romme. SPACEPLATES Building System: <https://anneromme.com/?portfolio=multi-color>

Fig.32. ICD / ITKE 2011: https://issuu.com/daniella_caillaux/docs/fi_fio

Fig. 33. LAGA

Fig. 34. LAGA. <https://dibash.home.blog/2020/04/12/robust-task-and-motion-planning-for-long-horizon-architectural-construction-planning-paper-summary/>

Fig. 35. LAGA. Planta, corte y alzado.

Fig. 36. LAGA. Sistema conectivo. https://www.oliverdavidkrieg.com/?page_id=559

Fig. 37. BUGA Wood pavilion. <https://www.oliverdavidkrieg.com/?p=987>

Fig. 38. BUGA Wood pavilion. <https://www.archdaily.com/916758/buga-wood-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart>

Fig. 39. Pabellones de investigación CFW ICD/ITKE 2012-2017. Marta Gil Pérez et al. Structural design assisted by testing for modular coreless filament-wound composites: The BUGA Fibre Pavilion.

Fig. 40. Pabellón ICD/ITKE 2012 y 2013-14 respectivamente:
<http://www.archdata.org/buildings/726/icditke-research-pavilion-2012>
<http://www.achimmenges.net/?p=20800>

Fig. 41 y Fig. 42. Ricardo la Magna. Integrative Numerical Techniques for Fibre Reinforced Polymers – Forming Process and Analysis of Differentiated Anisotropy, 2.

Steffen Reichert. Fibrous structures: An integrative approach to design computation, simulation and fabrication for lightweight, glass and carbon fibre composite structures in architecture based on biomimetic design principles, 35.

Fig. 43. Pabellón ICD/ITKE, 2013-14. Thomas van de Kamp. Beetle elytra as role models for lightweight building construction.

Fig. 44. Beetle elytra como modelo para la construcción de edificios ligeros. Thomas van de Kamp. Integrative computational design methodologies for modular architectural fiber composite morphologies. Beetle elytra. Moritz Doerstelmann. ICD/ITKE Research Pavilion.

Fig. 45. Moritz Dörstelmann et al. Integrative computational design methodologies for modular architectural fiber composite morphologies, 224.

Fig. 46. Pabellón ICD/ITKE 2013-14
<https://aasarchitecture.com/2014/07/research-pavilion-2013-14-icditke.html/research-pavilion-2013-14-by-icditke-14/>

Fig. 47. Pabellón ICD/ITKE 2016-17 <http://www.achimmenges.net/p=19995>

Fig. 48. Benjamin Felbrich. Multi-Machine Fabrication An Integrative Design Process Utilising an Autonomous UAV and Industrial Robots for the Fabrication of Long Span Composite.

Fig. 49. ICD / ITKE 2014-15. Integrated Design and Fabrication Strategies for Fibrous Structures

Fig. 50. Lauren Vasey. BEHAVIORAL DESIGN AND ADAPTIVE ROBOTIC FABRICATION OF A FIBER COMPOSITE COMPRESSION SHELL WITH PNEUMATIC FORMWORK.

Fig. 51. Diseño iterativo de haces de fibras primarias y secundarias. Lauren Vasey. BEHAVIORAL DESIGN AND ADAPTIVE ROBOTIC FABRICATION OF A FIBER COMPOSITE COMPRESSION SHELL WITH PNEUMATIC FORMWORK.

Fig. 52. BUGA Fiber Pavilion 2019: <https://parametric-architecture.com/buga-fibre-pavilion-by-icd-itke-university-of-stuttgart/>

Fig. 53. BUGA Fiber Pavilion 2019, vistas.

Fig. 54. Optimización estructural y racionalización del domo compuesto de fibra BUGA: Rejilla radial, rejilla tangencial, arcos. Bas Rongen. Structural optimization and rationalization of the BUGA fibre composite dome.

Fig. 55. Elementos tubulares, sintaxis.

Fig. 56. Fibre layup syntax shift ($90^\circ/180^\circ/360^\circ$) (top) and fibre layup models for the different syntax shifts and layup densities (bottom).

Coreless filament winding setup and process of one component for the BUGA Fibre Pavilion; glass fibre lattice body layer (left) and carbon fibre reinforcement layer. Marta Gil Pérez. Structural design assisted by testing for modular coreless filament-wound composites: The BUGA Fibre Pavilion.