

UN PROTOTIPO EN FLEXIÓN ACTIVA

ANTONIO HENRÍQUEZ
TALLER CASASSUS-ARAYA

LIBRO A

PREFACIO

UN PROTOTIPO EN FLEXIÓN ACTIVA

Investigación, formulación, especulación y prototipado

enero de 2020

I.

El proyecto de título se aborda como una investigación estructural y material, en donde se busca comprender un comportamiento físico específico, flexión elástica, como un principio estructural que permita imponer intenciones formales sobre un material.

II.

En principio, el producto final de este proyecto podría decantar en un prototipo funcional del sistema estructural investigado, o bien en un proyecto arquitectónico especulativo en base al mismo. La elección del producto de salida, el prototipo, fue parte del proceso que esta memoria documenta.

III.

El cuerpo principal de esta investigación consiste en el desarrollo de modelos prácticos y digitales a los que se les exige rendimiento estructural, tanto para obtener pistas de comportamiento como para probar intuiciones.

IV.

Esta memoria registra el proyecto de título como un proceso que va desde el planteamiento del fenómeno hasta el desarrollo de prototipos. Por claridad narrativa, éste se presenta como un ejercicio lineal con etapas claramente definidas, pero es importante entender que cada instancia de progreso (o retroceso) lleva a replantear los objetivos inmediatos y revisar el trabajo realizado.

V.

Es una premisa de este trabajo la experiencia empírica con objetos esencial para comprender su comportamiento físico. En concordancia, este prefacio incluye un modelo de las primeras versiones del prototipo y se alienta al lector a ensamblarlo.

ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

PREFACIO

Se plantean las directrices de este proyecto de título, fuertemente basado en exploración estructural y material. Entendiendo que el producto principal es un prototipo modular, se plantea que la mejor forma de introducir al lector con el producto es incluyendo un modelo ensamblable.

LIBRO I: FLEXIÓN ACTIVA

Contextualiza este proyecto de título como una continuación de los procesos de práctica y seminario, definiendo a partir de éstos el fenómeno físico a investigar, flexión activa, y la metodología experimental ocupada. Se concluye con una revisión histórica de la flexión activa en arquitectura.

LIBRO II: REFERENCIAS

Para comprender el rendimiento formal, material y estructural del principio, se revisa una serie de proyectos arquitectónicos que aplican flexión activa. La doble curvatura aparece como eje de investigación que permitiría explorar capacidad formal.

LIBRO III: EJERCICIO

Se registra una serie de modelos realizados que buscan la doble curvatura con diferentes materiales. El ejercicio lleva a un interés en elementos laminares que se tensen sobre sí mismos.

LIBRO IV: PANEL FLECTOR

El ejercicio de desarrollar modelos simples lleva a un prototipo de papel que se corta y tensa sobre sí mismo, convirtiéndose en un panel con volumen y superficie, el “panel flector”. En este libro se expone su funcionamiento modular, así como formas simples de asociación con otros paneles.

LIBRO V: ESPECULACIONES

Previo a decidir el producto de salida, el Pase de Título propone una instancia para discutir sobre las posibilidades del panel flector, el que se encuentra en fase de idea. Para alimentar esta discusión, se especula con las posibilidades arquitectónicas del prototipo: forma, rendimiento, transporte, modulación, etcétera.

LIBRO VI: PRODUCTO DE SALIDA

Se decide proseguir prototipando el panel flector. Este libro es una reflexión en torno a la decisión tomada, considerando factores como factibilidad, economía, tiempo y mano de obra. Se decide prototipar el panel en dos niveles: escala y forma. En el momento de editar esta memoria, ambos prototipos se encuentran como trabajo en progreso, por lo que en los siguientes libros se exponen los objetivos y avances de cada uno.

LIBRO VII: ESCALA

El objetivo del prototipo de escala es llevar la idea a una realidad habitable, probando materiales, métodos de transporte, uniones y técnicas de ensamble. Se desarrollan paneles cuadrados de 120cm de lado en flejes de pino, buscando montar un domo cuadrado regular de 6m de lado.

LIBRO VIII: FORMA

El objetivo de prototipo de forma es entender el rendimiento formal que tiene el módulo. Para esto se desarrolla un programa que ajuste los paneles a una forma libre, produciendo un arreglo de uniones que permitiría obtener la forma buscada. Se desarrollan paneles cuadrados de 50cm de lado con flejes de raulí.

CONCLUSIÓN

Comentarios finales sobre el trabajo realizado, objetivos cumplidos y trabajo pendiente.

FLEXIÓN ACTIVA

DE LA INVESTIGACIÓN Y EL FENÓMENO

Este proyecto de título se plantea a partir de la investigación del comportamiento de la materia deformada elásticamente por flexión, explorando ésto como un criterio estructural a través de modelos de distintas escalas y materialidades.

El objetivo específico de la investigación es generar herramientas que permitan imprimir intenciones formales sobre un ensamble de elementos que siguen una lógica estructural específica. Este objetivo está subordinado a la intención que implica un proyecto de título, es decir, poner en práctica el entendimiento obtenido en la escuela desarrollando un edificio cuyo uso, materialidad, forma y lugar decanten de lo investigado.

La inspiración y cimientos de este trabajo se encuentran en las experiencias obtenidas en la práctica profesional y seminario, en donde se investigaron distintas estructuras cuyas formas dependían de las fuerzas aplicadas. En la práctica profesional, con MCR+JAG, se analizaron y produjeron estructuras en base a mástiles móviles: *“Antena”*, *“El Coliseo”* y *“Refugio”*, siendo este último expuesto en la *Muestra Arquitectura y Madera 2018*, en Puerto Montt. Seminario se realizó en paralelo al proyecto de título de Pablo Schmidt, *“Una memoria hecha material”*, realizando un modelo estructural digital para un prototipo en base a tela rigidizada por arcos discretos.

Entendiendo este proyecto de título como una continuación de la práctica profesional y seminario, se adopta la política de investigación aplicada durante el proceso: reflexionar a través de la producción de objetos. Esta política se basa en la premisa de que la investigación intencionada hacia un edificio u objeto proyectual pierde parte de su capacidad explorativa y especulativa al ser dirigida inherentemente hacia su fin práctico. El objetivo es entender un fenómeno/comportamiento para tener un abanico de posibilidades de rendimiento proyectual. Por esto, se hace énfasis en la producción de *“objetos”* y no *“edificios”*.

“Llegar a la propuesta de arquitectura de forma distinta es sin duda valorable dado el punto de agotamiento que existe hoy en la escuela. La investigación como formulación de proyecto ha desaparecido. Y no solamente se ha dejado en la escuela, se ha olvidado en nuestro propio ejercicio profesional.”

Luis Goldsack

Una memoria hecha material (Schmidt P., 2019)

Arquitectura, ingeniería y tipología estructural

Durante la segunda mitad del siglo XIX, la construcción, como disciplina, incorpora el análisis estructural como una herramienta de proyección, la que garantiza integridad estructural mediante el cálculo (Kippers, 2013). El cálculo estructural, en su forma más eficiente, se realiza en base a una geometría bien definida que sirve como marco de referencia para abstraer, modelar y predecir la realidad. Por ejemplo, una viga se evalúa respecto a la línea horizontal que define; sobre esta se aplican fuerzas, miden deformaciones, establecen dimensiones y se evalúa factibilidad.

El desarrollo del análisis estructural decantó en un conjunto de tipologías geométricas y estructurales bien definidas, las que permiten un mayor control sobre la producción, pero limita la variedad formal (Lienhard et al, 2013). Eventualmente, surge la figura del ingeniero como el agente que se encarga de la factibilidad de una obra mediante el estudio de un catálogo de tipologías estructurales, teniendo la capacidad de evaluar cuál es ideal para una tarea dada (Kippers, 2013). La aparición de la tipología estructural como una herramienta de proyección establece una separación entre arquitectura e ingeniería, donde la primera se encarga del diseño de la forma y la segunda se encarga de su factibilidad (Fund, 2008; Lienhard, 2014).

Figura 1.
 Distintas tipologías estructurales para
 estructuras de sección activa[1].

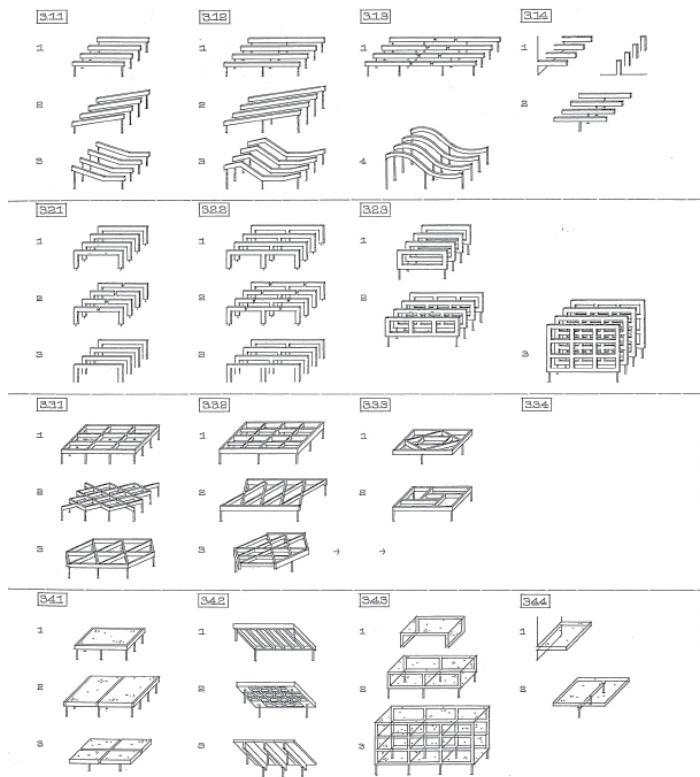


Figura 1.

Figura 2.

- a. Modelo de membranas de jabón en búsqueda de superficies mínimas [2].
- b. *Pabellón Alemán*, Frei Otto (1967) [2].

Estructuras con formas de auto-equilibrio

Desde la Revolución Industrial a la actualidad, los edificios diseñados a partir de tipologías estructurales han dominado el paisaje arquitectónico, al punto que aquella que rehuye de la tipología es conocida como “experimental” o “alternativa”.

Exponentes de este tipo de arquitectura son Fuller, Candela, Isler y Otto, entre otros, quienes trabajaban con estructuras que alcanzaban sus formas mediante el equilibrio de las fuerzas aplicadas, o formas de auto-equilibrio (Fund, 2008). El interés que tienen este tipo de estructuras es que presentan el desafío de encontrar formas óptimas para ciertas fuerzas aplicadas, las que como resultado dan ensambles con formas mecánicamente eficientes que minimizan materiales, siendo económicas y “estéticamente atractivas” (Fund, 2008).

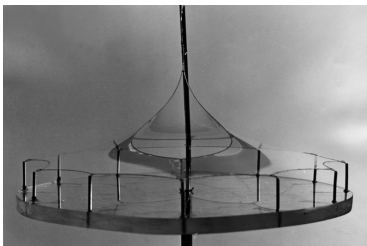


Figura 2a.



Figura 2b.

Figura 3.

Chozas Mudhif, Irak [3].

Se muestra el arco como el ejemplo más primitivo de flexión activa.



Figura 3.

Estructuras de flexión activa

Un de los criterios estructurales que se desarrollan entre las formas de auto-equilibrio es el de flexión activa: *“estructuras que usan activamente la flexión como un proceso de auto-formación”* (Lienhard et al, 2013). Es decir, son estructuras que se arman al forzar geoméricamente materiales con resistencia a la flexión, resultando en una forma curva.

Este principio corresponde a uno de los más primitivos y ocupados en la arquitectura vernácula debido a su simplicidad constructiva (fijar puntos de un elemento elástico) y el uso de materiales poco especializados. Históricamente, este tipo de estructuras se ha desarrollado por tres tipos de aproximaciones: por comportamiento, por geometría y por la geometría del comportamiento (Lienhard et al, 2013).

Figura 4.

Multihalle, Frei Otto + Carlfried Mutschler + Ove Arup (1975) [4].
Estructura de grilla reticular concebida a partir de modelos colgantes.

Aproximación por comportamiento

Este tipo de estructuras se pueden encontrar en la arquitectura vernácula de todos los continentes debido a la simplicidad de su principio: fijar al menos dos puntos de un material. Si bien su aplicación es extensa en distintas culturas, las edificaciones se ven limitadas por la misma simplicidad del principio, siendo el arco el principal exponente y la choza su principal aplicación.

Aproximación por geometría

Durante los años 50 hubo un apogeo en la investigación de formas de auto-equilibrio, usando la física aplicada como herramienta de proyección. Se trata de parametrizar geoméricamente las deformaciones a partir de las fuerzas aplicadas utilizando técnicas de *“form-finding”*, ensayos con modelos estructurales que responden a las perturbaciones. Las estructuras de flexión activa fueron estudiadas y rápidamente abandonadas debido a la complejidad matemática que



Figura 4.

Figura 5.

a. *Research Pavilion* ICD/ITKE, 2010 [5]. Pabellón toroidal formado a partir de láminas de terciado entrelazadas entre ellas.

b. Modelo digital para el cálculo y diseño del *Research Pavilion* ICD/ITKE [5].



Figura 5a.

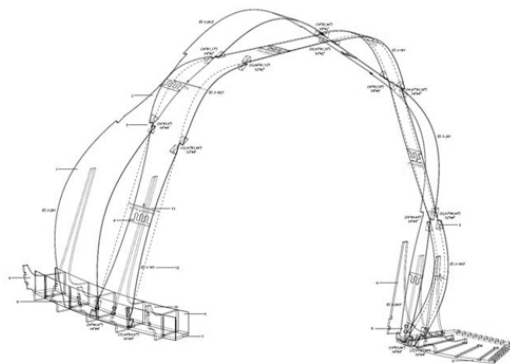


Figura 5b.

supone la geometría de la flexión. El mejor rendimiento que se logró fue de estructuras de grillas reticulares, las que permiten deformaciones internas. De todas formas, la flexión se aproximó con modelos colgantes, complejizando el diseño de piezas y montaje.

Aproximación por geometría del comportamiento

Entre los años 2000 y 2010, la mejora tecnológica de los medios digitales permite calcular este tipo de estructuras mediante simulaciones físicas, provocando un nuevo interés en el principio. Desde el año 2010 se han ejecutado una variedad de pabellones que siguen este principio: *Research Pavilion* (ICD/ITKE, 2010), *MOOM* (Kojima, 2011), *FAHS* (Quinn et al, 2017), entre otros, los que resaltan su aspecto económico y simplicidad de ensamble.

Figura 6.

Pasos en la simulación del PHC, desarrollada durante seminario [6].

Experiencia con estructuras de flexión activa

Uno de los productos del proyecto de título de Pablo Schmidt es el "prototipo híbrido cónico" (PHC en adelante), una estructura a flexión activa compuesto de tela y arcos de acero, el que alcanza un volumen de 1600 litros (un cubo de 117cm de lado). El proyecto de seminario consistió en el análisis estructural de este prototipo mediante simulaciones físicas con el fin de tener un mejor entendimiento de su comportamiento y poder proyectar uno de mayor escala.

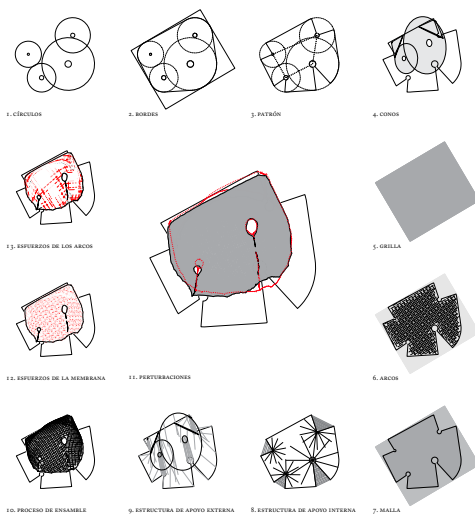


Figura 6.

LIBRO II

REFERENCIAS

DE LOS CASOS DE ESTUDIO

Los ejemplos de obras desarrolladas en base a flexión activa son escasos (en el gran esquema de la edificación) debido a la complejidad que supone la descripción del fenómeno, y por ende, su análisis y aplicación. Sin embargo, con el desarrollo de nuevas tecnologías, se ha podido explorar de forma más precisa este principio y producir un catálogo de edificaciones.

Este libro tiene el objetivo de revisar obras realizadas en base a flexión activa con el fin de entender los mecanismos físicos que delimitan la intención formal: materialidad, direcciones de flexión y construcción. Con la comprensión del estado del arte, se espera establecer una hoja de ruta que guíe la exploración.

Las materialidades revisadas son bambú, terciado, acero e híbridos de membrana con elementos compresores. Los materiales no sólo determinan la capacidad elástica de los elementos de construcción, sino que también la geometría base de los elementos, lógicas de ensamble y temporalidad del producto final.

Siendo el arco la forma más primitiva del fenómeno puesto en práctica, formalmente las construcciones difícilmente escapan de la bóveda unidireccional, siendo un antecedente de límite formal. El arco se forma al flectar un elemento lineal forzando sus extremos entre ellos, realizando torque en dirección perpendicular al plano que describe el arco. Se entenderá esto como flexión en una dirección. Se considera la premisa de que la flexión de más de una dirección permitiría una mayor variedad de posibilidades formales, y por esto, en los ejemplos de a continuación se considera si la flexión se da en una o más direcciones y el rango formal que esto implica.

Figura 1.

Fotografías del *Bamboo Sports Hall* [8].

a. La cubierta es ornamental, tratando de parecerse a las flores locales. Para esto, la estructura debe permitir formas curvas y distintas alturas a lo largo del edificio.

b. La estructura es a base de arcos de bambú de distintas alturas.

c. Acercamiento a los elementos a flexión.

Bamboo Sports Hall

Chiangmai Life Construction,
2017

Namprae, Tailandia

Este proyecto es uno de los pocos ejemplos de uso permanente y de gran superficie, con 782m². Estructuralmente sigue la simplicidad de las construcciones primitivas, construyendo un gran galpón a partir de arcos de bambú. La cubierta es una grilla reticular que se apoya en una secuencia de arcos de distintos tamaños, teniendo libertad formal ajena a la integridad del conjunto.



Figura 1a.



Figura 1b.



Figura 1c.

Figura 2.

Fotografías del MOOM [9].

a. Las barras alternadas forman arcos intercalados de distintas alturas.

b. Imagen interior.



Figura 2a.



Figura 2b.

MOOM

Kojima+Sato+Taiyo Kogyo, 2010
Chiba, Japón

El pabellón se forma a partir de una membrana es presensada con un arreglo de puntales que se adhieren a ella, formando un material híbrido. Los puntales se ubican a lo largo de un solo sentido, por lo que el conjunto adquiere resistencia a la flexión solo en esa dirección. Estructuralmente, los puntales funcionan como arcos independientes, pero a diferencia del caso anterior, la cubierta (membrana) es parte de la integridad, y la capacidad de deformarse permite manipular la relación entre los arcos.

Figura 3.

Fotografías del *PHC* [10].

a. La doble curvatura y la capacidad de ajustes internos de la tela permiten la aplicación más libre de formas.

b. Los cortes circulares se realizan para poder cerrar el plano sobre sí mismo sin producir puntos críticos de rigidez.

PHC

Pablo Schmidt, 2018-19
Santiago, Chile

A diferencia de *MOOM*, el arreglo de elementos compresores del *PHC* se dispone en dos direcciones, permitiendo flexión activa en dos sentidos. El aparejo crea “discos” de rigidez distribuidos en una grilla regular, formando cintas de resistencia.

La capacidad de la tela de absorber deformaciones internas permite que los discos se acomoden a distintas exigencias geométricas de la estructura. Esto permite un mayor abanico formal, pero compromete la estabilidad del conjunto.



Figura 3a.

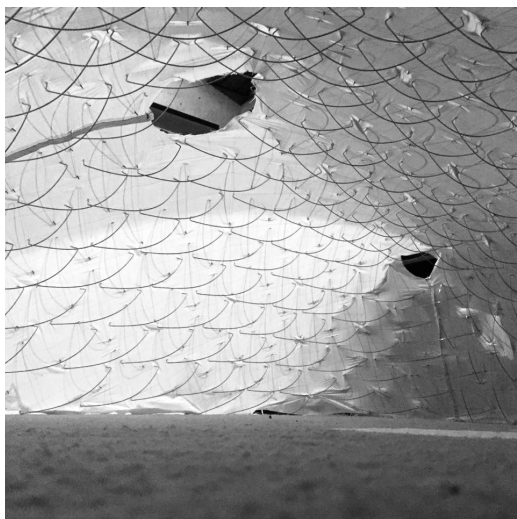


Figura 3b.

Figuras 4.

Fotografías del *Plydome* [11].

- Versión de aristas con paneles simples.
- Patente de la versión de aristas dobles.
- Versión de aristas con paneles dobles.



Figura 4a.

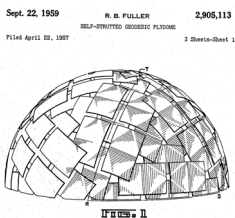


Figura 4b.



Figura 4c.

Plydome

Buckminster Fuller, 1957

San Francisco, Estados Unidos

Partiendo del principio de crear un domo geodésico libre de marcos, es decir, que la cubierta sea parte de la integridad, Fuller explora la variación del domo con planchas de terciado. Las planchas se unen entre ellas por las esquinas a distintos niveles de traslape, permitiendo la deformación de las esquinas en distintas direcciones.

Es importante notar que la placa se flexa en ejes que no coinciden, ya que el pliegue en dos sentidos causaría la fractura del material. La doble curvatura se obtiene en la asamblea discreta de curvaturas simples.

Figura 5.

Fotografías del *Research Pavilion 2010* [5].

- a. Construcción del pabellón. Se exalta la facilidad constructiva al poder realizarse con cinco personas y fijando puntos de anclaje específicos.
- b. Imagen exterior.

Research Pavilion 2010 ICD/ITKE

Institute of Computational Design, 2010
Stuttgart, Dinamarca

El pabellón se compone de arcos de terciado que se entrelazan entre ellos de forma similar al *MOOM*, pero con un patrón de corte que resulta en una forma toroidal. A diferencia de *Plydome*, este pabellón aborda formas sin simetría, y, a diferencia del *MOOM* y *PHC*, lo hace con superficies rígidas. Estas complicaciones suponen un problema de cálculo y geometría que no se podría asumir sin simulaciones físicas, las que fueron usadas para su desarrollo y construcción.



Figura 5a.



Figura 5b.

Figura 6.

a. Modelos de papel sobre el desarrollo del *Pabellón Fukita* [12].

b. Fotografía exterior del *Pabellón Fukita* [12].



Figura 6a.



Figura 6b.

Pabellón Fukita

Ryue Nishizawa, 2013
Kagawa, Japón

El pabellón consiste en dos superficies compuestas por planchas de acero, una más grande que la otra. La unión de las dos superficies por sus esquinas produce la compresión de la más grande mediante la tensión de la más chica, formando un espacio intermedio análogo a un arco, pero invertido y en dos direcciones. Este pabellón supone la aplicación del principio de flexión del *Plydome* llevado en acero, en el que un plano rectangular se puede doblar en más de una dirección siempre que las líneas de flexión no se encuentren entre ellas.

Si bien el planteamiento del pabellón es a través de modelos de papel inicialmente planos, se sospecha que las placas tienen que estar pre-formadas para lograr la geometría, siendo posible que no sea un caso de flexión activa.

“El actual desarrollo de nuevos materiales y herramientas de simulación sugiere que los recientes proyectos presentados, los que exhiben flexión activa en varias expresiones tipológicas, de ninguna manera han agotado el campo de aplicación. (...) A pesar de la aparente libertad de expresión formal (...), todas las estructuras de flexión activa dependen de mecanismos físicos de definición formal a los que las intenciones de diseño deben subordinarse.”

Lienhard et al.

Active bending, a review on structures where bending is used as a self-forming process (2013)

Hacia el ejercicio

Con los ejemplos revisados se pueden distinguir dos tipos de materialidades: simples (*Plydome, ICD/ITKE, Fukita*) y compuestas (*Bamboo Sports Hall, MOOM, PHC*), donde los primeros operan con un material único presentado en un formato particular, mientras que los segundos usan más de un elemento asociados en un diseño particular. Los primeros distribuyen los esfuerzos estrictamente via superficies, mientras que los segundos tienen la libertad de pasar de superficies a líneas (puntales, arcos simples), lo que permite diseñar y especializar piezas.

Se considera que las placas rígidas flectadas presentan una oportunidad de investigación al tener la dificultad de cambiar las funciones de un elemento mediante el cambio de formato y posicionamiento. Así, el ejercicio se enmarca en la exploración de placas rígidas, con el compromiso formal de obtener curvaturas en distintas direcciones.

LIBRO III

EJERCICIO

DEL PROCESO

Las referencias arquitectónicas presentadas en el LIBRO II dejan entrever que el repertorio formal de este tipo de estructuras está fuertemente ligado a la capacidad de salir del arco, es decir, poder crear curvatura en más de una dirección. En particular, se presenta el desafío de lograr esto con el uso de un material único; establecer un formato y ensamble tal que el mismo material permita versatilidad en elementos de integridad estructural.

Este libro registra el proceso inicial en la búsqueda de una estructura en flexión activa, el que se basa en la ejercitación con modelos rápidos, baratos y frágiles, los que permiten la producción masiva de objetos que evidencian su comportamiento y fracturas.

Para ideas iniciales, los modelos son principalmente de papel y cartón, los que eventualmente evolucionan, con un incremento en escala, a prototipos de madera y aluminio.

El principal referente para esta ejercitación es el *Pabellón Fukita*, que logra crear integridad a partir de dos placas de un mismo material, cada una con un funcionamiento específico, dado por el formato de los elementos (una placa más gruesa que comprime y otra más delgada que tensa).

Figura 1.

Esquemas de las fuerzas aplicadas sobre un plano y las deformaciones resultantes.

Figura 2.

Modelo del doblado de un plano. Este sería un caso de material compuesto, o de forma activa, es decir, que cada material ejerce un esfuerzo específico.

Doblado del plano

Un primer ejercicio consistió en reproducir el *Pabellón Fukita* en papel para entender sus limitaciones y posibilidades formales. Al forzar papeles en dos direcciones, se hace evidente que la curvatura doble en realidad viene dada por curvaturas simples que no se relacionan entre ellas, pero comparten la misma superficie.

Cuando las deformaciones independientes se encuentran, crean un punto crítico que fracturan el material independiente de su rigidez. Una estrategia para eliminar este problema es extraer la porción de superficie donde se produce el encuentro.

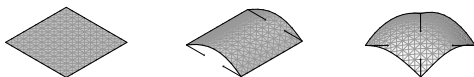


Figura 1.

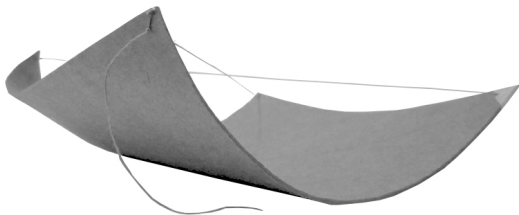


Figura 2.

Figura 3.

Esquema de un cuadrado al que se le fuerzan las esquinas entre ellas. Entre más grande es la tensión, más cerca del centro se encuentran las líneas de flexión. Cuando éstas se tocan, el material se fractura independientemente su flexibilidad, estableciendo un límite de la deformación.

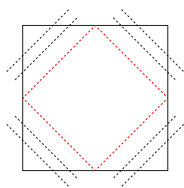


Figura 3.



Figura 4a.

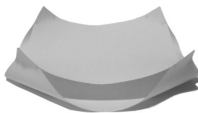


Figura 4b.

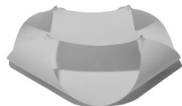


Figura 4c.

Figura 4.

Distintos intentos de reproducir el *Pabellón Fukita* en papel, en donde se varió el tamaño de las superficies y el área en el que se unían (desde a un punto a un triángulo). Ningún modelo logró reproducir la curvatura que muestra el pabellón, sugiriendo que los elementos tenían distintos grados de resistencia a la flexión.

Figura 5.

a. Modelo de couché doble, construido con piezas independientes entrelazadas entre ellas, permitiendo la rotación..

b. Modelo de cartón piedra consistente en una única placa con cortes transversales análogos los compresores del *MOOM*.

Deconstrucción y construcción de un material

Siguiendo la lógica de que la substracción de elementos expande la posibilidad de forzar el material sin fracturarlo (o bien, fracturarlo controladamente), se exploró la deconstrucción (extraer elementos) y la construcción (unión de elementos con debilidades intencionadas) de un plano flexible.

Los debilitamientos generan la capacidad de reajuste de los materiales, siendo similares a los comportamientos de *MOOM* y *PHC*, pero notoriamente más limitados debido a la rigidez material.

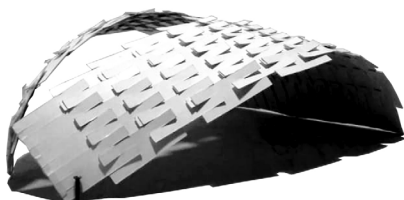


Figura 5a.

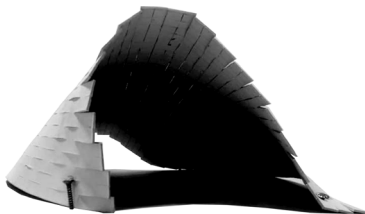


Figura 5b.



Figura 6.



Figura 7.

Figura 6.

Modelos de flejes flectados en una dirección hechos en cartón madera. Los listones están individualmente flectados por una cuerda, y al forzar el sistema, se apilan por compresión.

Figura 7.

Aplicación en dos direcciones de flejes en dos direcciones.

Del plano al fleje

Se plantea deconstruir en flejes arreglados en dos direcciones. Un fleje por sí solo produce un arco convencional, y la unión de ellos genera una estructura que trabaja a compresión (Figura 6).

La unión de los elementos en dos direcciones genera una estructura similar a una caja de huevos capaz de erguirse según la unión entre flejes.

En este punto, los tensores que hacen de cada fleje un arco, dejan de trabajar ya que estos se comprimen por el contacto de los demás flejes. Más aún, los tensores que llegan a piso se sueltan completamente. La estabilidad formal de la estructura podría mejorar si los tensores tuvieran la capacidad de comprimir.

Figura 8.

Modelo de nueve arcos dobles realizado en flejes de terciado.

Figura 9.

Como la curvatura del sistema depende de la de cada arco, se buscó como maximizarla con distintos tensores. El arco que maximiza la curvatura es el que une los extremos con el centro del listón.

Escala y estabilidad

Se escala el modelo de arcos dobles a uno realizado en flejes de terciado de 50cm de largo. Como el modelo funciona a compresión entre arcos, se estudia la forma óptima de producirlos, es decir, que la curvatura quede lo más cerca posible de sus extremos.

Al escalar, el modelo evidencia problemas de torsión que eran a penas perceptibles en los modelos de cartón madera. Una solución posible es el arriostramiento a través de elementos tensores, como una tela.

Con el escalamiento, la necesidad de que los tensores tengan la capacidad de comprimir se hace crítica.

Figura 10.

El modelo de flejes tiene problemas de cizalle, lo que se puede resolver arriostrando con tela. En este caso, la tela no es parte de la integridad, pero sí de la estabilidad.

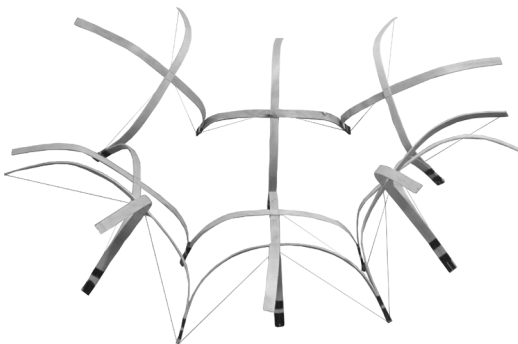


Figura 8.

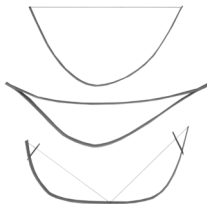


Figura 9.



Figura 10.

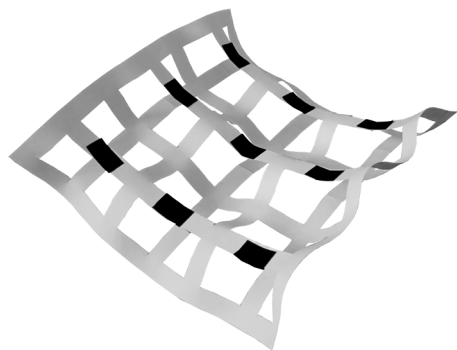


Figura 11.

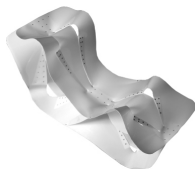


Figura 12a.



Figura 12b.

Figura 11.

Patrón de corte de una hoja de papel. Se extraen elementos y el papel se tensa sobre sí mismo, obteniendo doble curvatura.

Figura 12.

Referencia de artefactos a flexión activa realizadas en un plano único.

a. *Office Chaise Lounge* (Panagoulia+Schleiner, 2016) [13].

b. *Pneumatic Archetype* (Tobias Øhrstrøm, 2013) [14].

De vuelta al plano

Se vuelve a considerar el plano rígido aplicando las lógicas estudiadas de los flejes. El objetivo inmediato es crear un plano de doble curvatura extrayendo la menor cantidad posible de material.

Un primer modelo es una grilla a la que se le extraen elementos cuadrados permitiendo la flexión independiente de flejes. Al corresponder elementos, una colección de flejes se tensa y otra se comprime, produciendo doble curvatura.

Figura 13.

- a. Patrón de corte de un plano.
- b. Objeto volumétrico formado al corresponder los tensores del plano cortado.

Prototipo de plano flectado

Del modelo anterior se descubre la naturaleza modular que adquiere el sistema: Los cuadrados grandes y pequeños extraídos actúan sobre una cruz particular. Si los cuadrados grandes se recortan, pero no se extraen, pueden usarse para tensarse entre ellos, comprimiendo las cruces y formando un volumen con dos direcciones de curvatura.

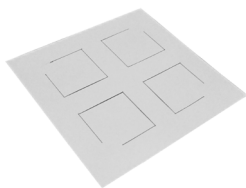


Figura 13a.



Figura 13b.

PANEL FLECTOR

DEL PROTOTIPO

El panel flector es un módulo tridimensional formado a partir de la flexión de una superficie bidimensional inicialmente plana, resultando en un elemento con curvatura en dos sentidos. La unión adyacente de paneles permite armar superficies curvas.

En el diseño del panel, la idea es facilitar la flexión en dos sentidos en un plano deconstruyéndolo mediante cortes, permitiendo flexiones independientes. Los elementos remanentes de los cortes realizados se usan como tensores, minimizando la pérdida de material y el aparataje constructivo.

La lógica del panel se aplica en dos versiones: íntegra y de flejes. La primera consiste en el plano sin extracción de material, por lo que el panel se define como una superficie. En la segunda, los tensores se reducen al mínimo dejando flejes que conectan las esquinas del plano directamente, definiéndose como un marco.

Al ser modular, el rendimiento formal y espacial que tiene el prototipo depende directamente de cómo se conectan los paneles, por lo que gran parte de la investigación se enfocó en el comportamiento resultante de las uniones.

La realización de los modelos prácticos se vio marcada por la complicación material que supone la naturaleza mecánica del prototipo: por un lado, los modelos no tienen una larga vida, siendo los construidos en aluminio los únicos que no presentan fracturas o debilitamiento después de unas semanas. Por otro lado, para que los modelos de cartón, madera y aluminio realmente trabajen y no se deformen plásticamente, se debe trabajar con paneles cuadrados de lado entre 20 y 50 centímetros.

Figura 1.

- a. Panel flector íntegro. Una superficie se corta y tensa sobre sí misma, sin pérdida de material.
- b. Panel flector por flejes. Los tensores se simplifican en flejes.

Figura 2.

- Resistencia a esfuerzos externos.
- a. Esfuerzos sobre el punto central de un arco es respondido por el antagonista mediante la cruz central.
 - b. Esfuerzos sobre el centro de la cruz. Esta se hace un diafragma sostenido

por los arcos.

- c. Esfuerzos paralelos a los arcos. Los tensores comienzan a comprimir, pero sin presentar mucha resistencia.
- d. Esfuerzos diagonales en la base de los arcos. El panel no tiene arriostamiento y cede fácilmente.

Figura 3.

Entre más anchas las piezas, más torsión de les aplica. En la serie A, compresores y tensores son del mismo ancho, en serie B los compresores centrales son el doble de ancho.

Funcionamiento mecánico

Como forma resistente, se puede entender el panel como cuatro arcos conectados por sus extremos y una cruz central. Cada arco define un plano que es resistente a esfuerzos perpendiculares (Figuras 1a y 1c). Además, la cruz central forma un diafragma inscrito en los arcos, resistiendo esfuerzos superiores (Figura 1b). Por otro lado, el panel no cuenta con elementos diagonales, presentando debilidad a esfuerzos en este sentido (Figura 1d).

El volumen que define un panel está relacionado con las proporciones del corte, específicamente con dos factores principales: distanciamiento entre tensores y longitud de los arcos. El primer factor se relaciona con la tensión a la que está sometido el panel, entre más distanciados están los tensores, más esfuerzo se hace al corresponderlos. El segundo factor define la curvatura con la que responde el arco a cierto esfuerzo, entre más corto, más se tiene que curvar en respuesta a la tensión.



Figura 1a.

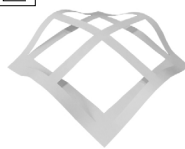


Figura 1b.

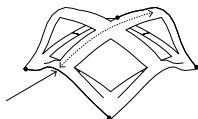


Figura 2a.

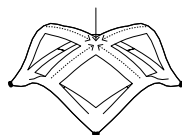


Figura 2b.

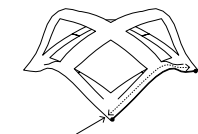


Figura 2c.

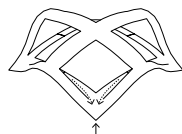


Figura 2d.

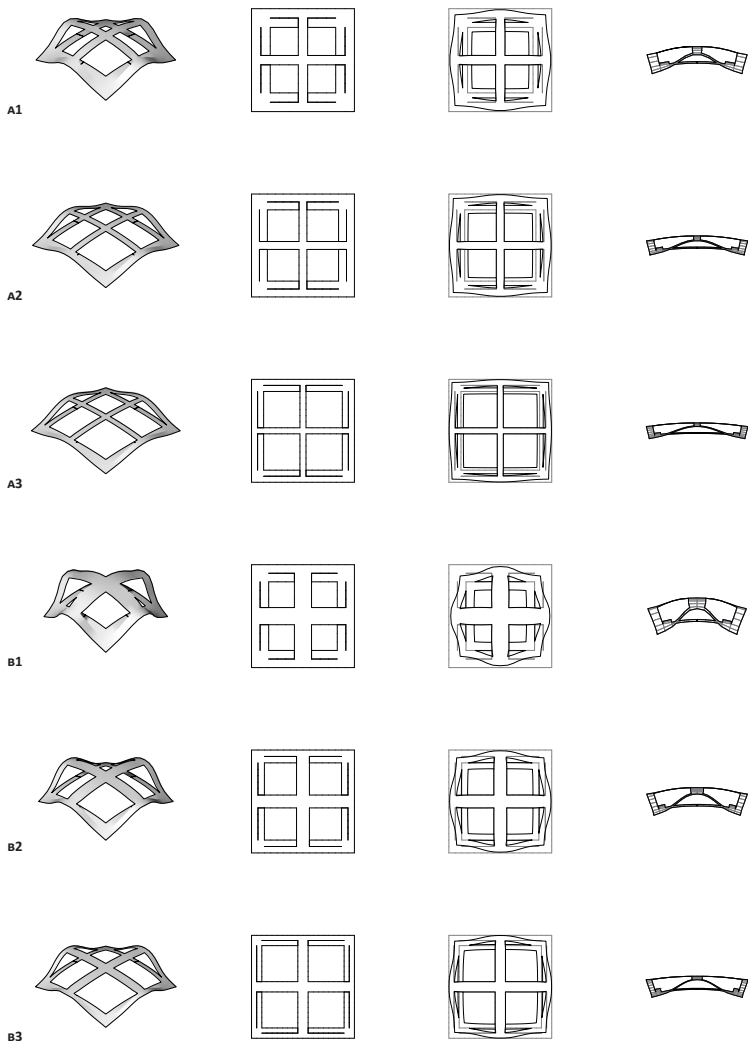


Figura 3.

Figura 4.

Esquema de un arco de medio punto con ladrillos de forma trapezoidal.

Figura 5.

Esquema de un arco formado por paneles flexibles. En perfil y planta se muestra en gris las zonas más flectadas.

Unión y curva

Cada panel se inscribe dentro de una caja trapezoidal, por lo que la asociación de módulos sigue la lógica del arco de medio punto. Así, la curvatura resultante viene dada por la inclinación de los bordes de cada panel (la que a la vez, como se puede ver en el catálogo anterior, viene dada por la geometría del corte) y el tipo de unión entre paneles.

Esfuerzos

En la experiencia con modelos prácticos rígidos (cartón, aluminio y madera), los flejes perimetrales son los más frágiles y usualmente los que muestran fracturas. Con modelos digitales se logra describir la distribución de esfuerzos en la superficie, coincidiendo con lo observado prácticamente.

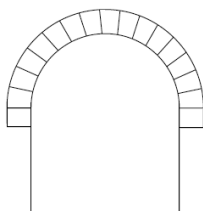


Figura 4.

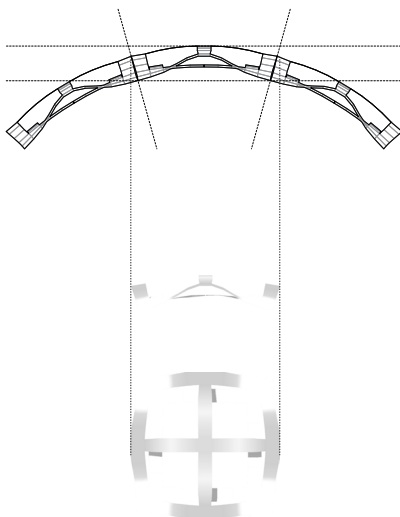


Figura 5.

Figura 5.

Bóveda formada por paneles flectores, siguiendo la lógica del arco de medio punto, pero en dos direcciones. En isométrica, la distribución de esfuerzos elásticos del panel. Se muestra en gris las zonas más flectadas.

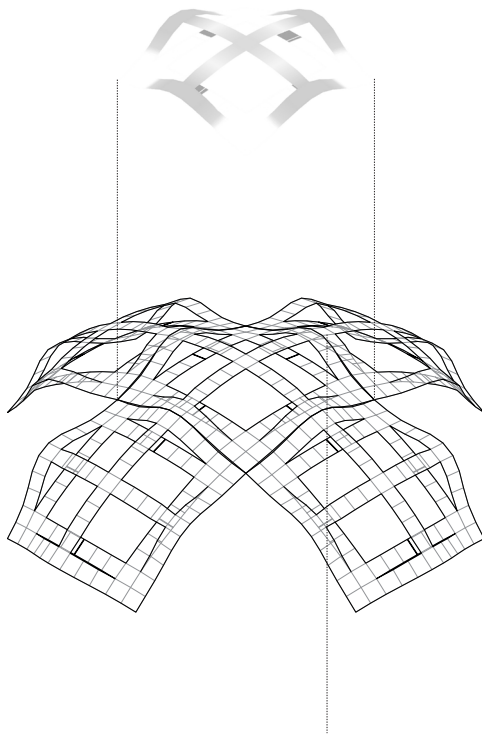


Figura 6.

Figura 7.

Esquema de los puntos de unión y dirección de esfuerzos. En este caso, todas las uniones son a tensión.

Figura 8.

Modelo de unión regular realizado en cartón forrado. Se inscribe en una caja de 60cmx60cmx20cm.

Unión regular

La unión simétrica de un arreglo de paneles resulta en una bóveda cuadrada, con una forma similar a un rectángulo doblado en sus esquinas. Los paneles se unen por sus listones centrales, mientras que la distancia entre esquinas depende de las fuerzas aplicadas (la unión completa imposible debido a que los paneles se bloquean entre ellos).

Las simulaciones digitales muestran que la forma está limitada por la cantidad de paneles: entre más haya, los centrales tienen a conformarse como un plano y los esfuerzos se distribuyen a los bordes.

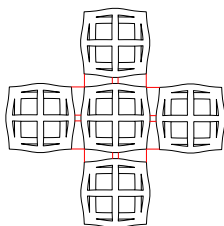


Figura 7.

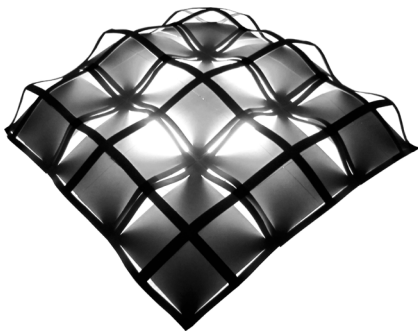


Figura 8.

Figura 9.

Esquema de los puntos de unión y dirección de esfuerzos. En este caso, las uniones son a tensión, con excepción las esquinas en el sentido del decrecimiento de los arcos.

Figura 10.

Esquema de corte de los paneles y modelo realizado en couché simple. Se inscribe en una caja de 100cmx100cmx60cm.

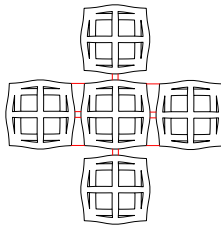


Figura 9.

Unión direccionada

Análogo al *MOOM*, los paneles se asocian como arcos independientes de distintos tamaños, los que se unen para formar una cubierta. Para formar arcos, los paneles se unen entre listones centrales y esquinas en una sola dirección, mientras que los arcos se unen entre sí por los listones centrales.

En el modelo de la imagen, se introduce la deformación de los paneles centrales a partir de trapecios, reduciendo progresivamente el tamaño de los arcos.

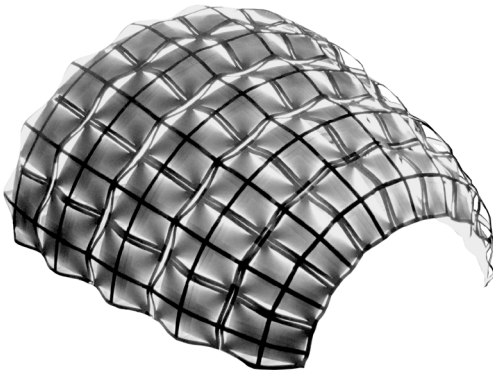


Figura 10.

Figura 11.

Esquema de los puntos de unión y dirección de esfuerzos, donde los puntos a, b y c indican la correspondencia de punto. En este caso, las uniones entre listones centrales son a compresión y las esquinas a tensión.

Figura 12.

Modelo realizado con listones de pino. Se inscribe en una caja de 180cmx180cmx120cm.

Unión por patrón

Análogo al *PHC*, en este caso los paneles se juntan en plano describiendo una forma particular, para luego erigirse correspondiendo segmentos del contorno.

Esta es la forma más abierta, versátil e impredecible de unión, y por lo mismo, a la fecha, la menos explorada.

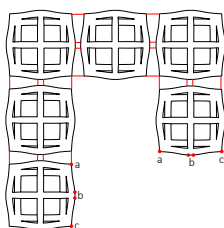


Figura 11.



Figura 12.

LIBRO V

ESPECULACIONES

DEL RENDIMIENTO COMO ESPACIO HABITABLE

Lejos de considerar el panel flexor como un prototipo completamente estudiado desde el punto de vista mecánico y formal, se considera relevante evaluar el rendimiento que tiene como espacio habitable en vista a la continuación del proceso. Así, en este libro se plantean tres especulaciones de proyecto a partir del panel flexor, con la intención de explorar sus posibles aplicaciones y levantar las preguntas que el prototipado necesitaría responder para poder plantear un proyecto.

Si bien la estructura de esta memoria es tal que la explicación de la mecánica del panel (LIBRO IV) se separa de la especulación sobre éste como un espacio habitable (LIBRO V), es importante entender que esta última siempre está presente en la observación de los objetos producidos, y cuando éstos son lo suficientemente refinados en su funcionamiento mecánico, la habitabilidad comienza a ser un factor en el diseño.

En estas especulaciones se consideran las características que tiene el panel, tanto por lo aprendido en el proceso experimental como por lo revisado en la literatura:

- i. el montaje final debiese ser un proceso simple de correspondencia entre tensores y fijaciones a tierra,
- ii. el carácter modular permite el transporte,
- iii. los materiales deberían ser flexibles y poco especializados,
- iv. a menos que se realice con acero, los edificios que utilicen este sistema serían temporales.

Figura 1.

El proceso de construcción.

De izquierda a derecha: flejes necesarios, construcción y puntos de correspondencia, ensamble.

Figura 2.

Isométrica explotada con las telas que forman piso y cubierta.

Figura 3.

Planta cubierta y corte.

Refugio

Esta es una aplicación habitable de un módulo por sí solo. A partir de los modelos realizados con flejes de pino, se ve la posibilidad de escalar el panel utilizando flejes simples superpuestos entre ellos, reforzando los puntos de llegada a piso y los de máxima compresión.

Otra consideración que se hace con este modelo es la tensión diferenciada a los listones correspondientes: al tensar uno más que otro, el panel se erige irregularmente, generando distintas curvaturas y la inclinación del plano central. Experimentaciones con terciado dejan ver que, para evitar fracturas de material, lo óptimo sería utilizar distintos espesores de placa según la curvatura y esfuerzos que se exigen.

Entendiendo que un refugio es un habitáculo básico, tanto base como cubierta se resuelve a través de membranas tensadas.

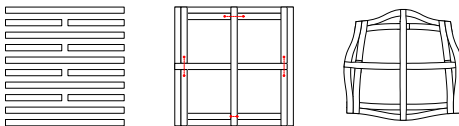


Figura 1.

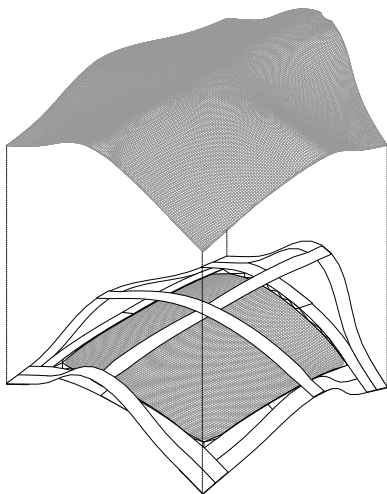


Figura 2.

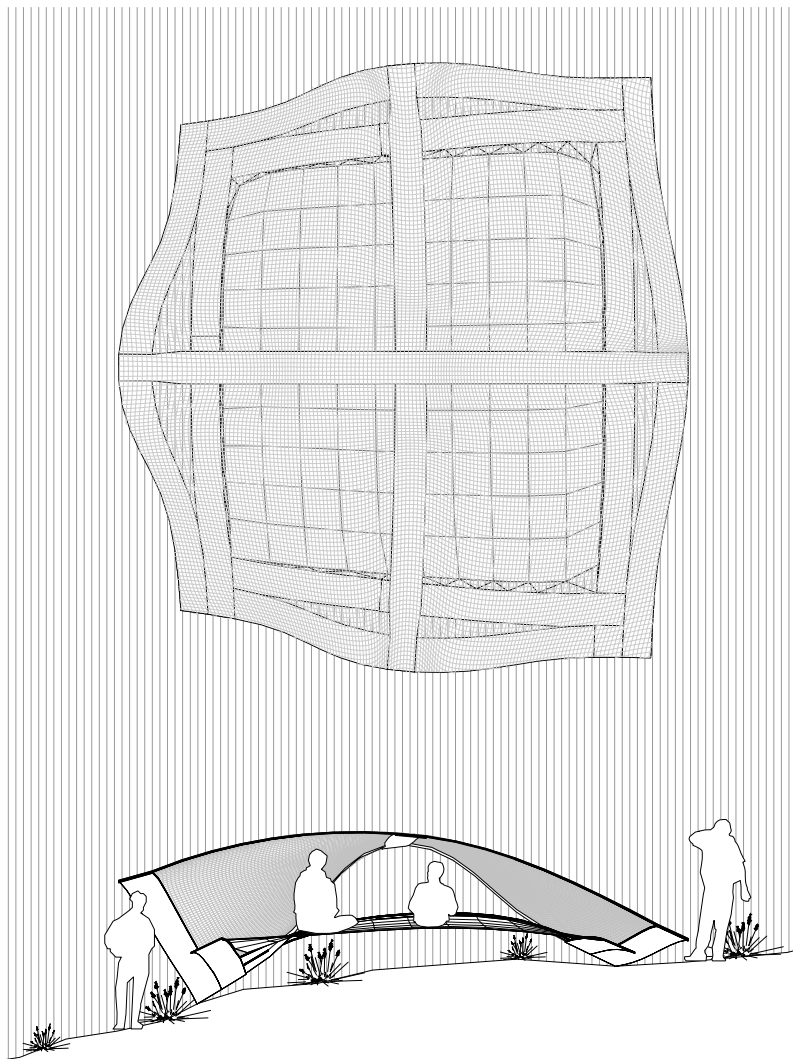


Figura 3.

Figura 4.

Imagen interior de un galpón de 4x4 paneles, construido en aluminio.

Figura 5.

Imágenes exteriores de un galpón de 3x3 paneles con iluminación interior, construido en cartón forrado.

Galpón

Esta es la aplicación más directa del sistema, al ser la demostración de lo que se buscaba forzar en el diseño del prototipo: una superficie única que se fuerza a tener doble curvatura.

El galpón sería el ensamble regular de una colección de paneles flectores, generando una superficie que se suspende en cuatro patas.

Formalmente y en lógica guarda una clara analogía con el *Pabellón Fukita*, pero constructivamente guarda mayor similitud con el *Plydome* y *Research Pavilion 2010*, al consistir en planchas y flejes entrelazados y doblados individualmente. Por lo mismo, la especulación constructiva del galpón se basa en estos proyectos: podría desarrollarse en madera, utilizando planchas de contrachapado o listones independientes. Se considera la posibilidad de tener que utilizar técnicas de doblado plástico mediante la humectación de los materiales.

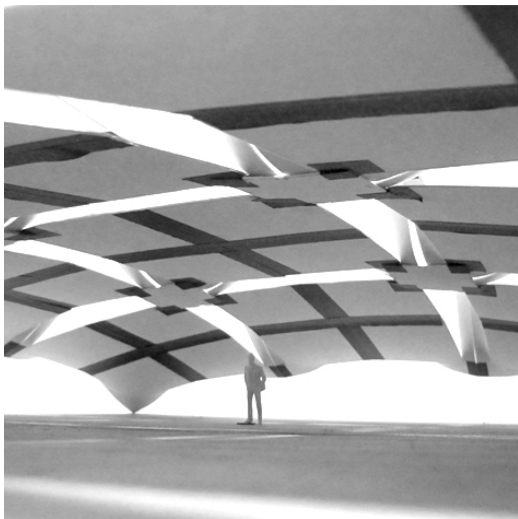


Figura 4.

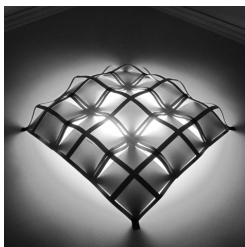


Figura 5a.



Figura 5b.

Figura 6.
Sombras de un galpón de 4x4 paneles,
construido en aluminio.

Figura 5.
Imágenes exteriores de un galpón de
4x4 paneles con iluminación interior,
construido en aluminio.

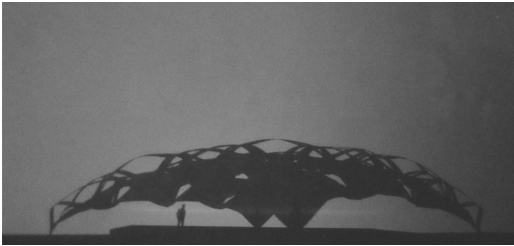


Figura 6a.

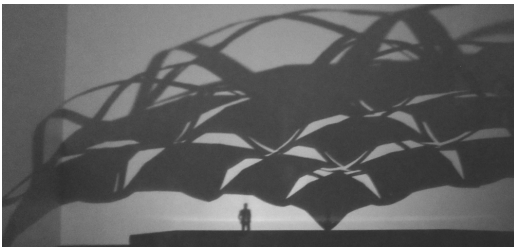


Figura 6b.



Figura 7a.

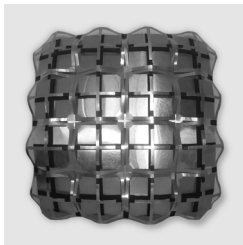


Figura 7b.

Figura 8.
Imagen de un galpón.



Figura 8.



Figura 6.

a. Isométrica del modelo. En analogía al *Bamboo Sports Hall* y *MOOM*, se forman arcos de distintas alturas. Para ésto, los paneles están cortadas en forma de trapecoide.

b y c. Corte transversal y longitudinal del modelo. El volumen se rellena entre compresores y paneles tensores con algún material moldeable que le de permanencia a la estructura.

Moldaje

Esta especulación surge con dos premisas: emular a forma del *MOOM* y subvertir la temporalidad que pueda tener el sistema.

Para adquirir la forma del *MOOM*, se toma la misma estrategia de ese proyecto; así como se acortan las barras hacia los extremos y se cierra la tela para hacer arcos más pequeños, en este caso los paneles se cortan en forma de trapecio, aumentando la curvatura en un sentido específico.

Por otro lado, se plantea la posibilidad de solidificar el pabellón utilizando los paneles como moldaje para la aplicación de algún material plástico (arcilla, espuma de poliuretano, yeso, etcétera), entre los arcos compresores y paneles tensores.

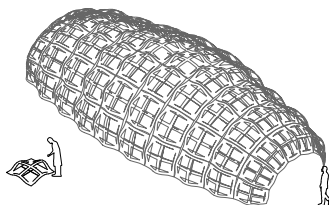


Figura 9a.



Figura 9b.

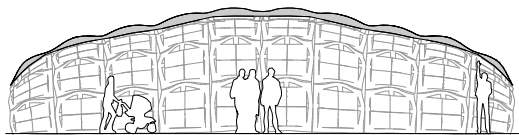


Figura 9c.

LIBRO VI

PRODUCTO DE SALIDA

DE LAS DECISIONES

Los ejercicios realizados hasta el *Pase de Título* se enfocaron en desarrollar la idea básica del panel flector: cuál es su principio, cómo funciona físicamente, qué materiales se podrían ocupar y para qué podría servir. Hasta este punto, se consideró más importante tener claridad en el ejercicio que apurarlo a concretar un resultado; poder plantear un proceso que va desde doblar papeles y cartones a vislumbrar un posible sistema constructivo con la suficiente rigurosidad como para exponerlo en el pase de título y debatir de las posibilidades de la idea.

El *Pase de Título*, más allá de ser un evento en la formalidad del proceso de título, se tomó como una oportunidad para exponer el proceso, la idea y el posible rendimiento, informando la decisión en torno a cómo seguir.

En esta discusión se utilizó la expresión “producto de salida”, entendiendo esto como la materialización de la investigación en el contexto de Título, *qué se hace con ésto*. En las posibilidades consideradas estaban el proyecto y el prototipo.

Si bien se podría entender que el producto del proyecto es algo dado, las discusiones relativas a esta decisión con profesores, comisión y Pablo Schmidt, dieron lugar a reflexiones sobre las políticas de producción y presentación de un trabajo experimental, lo que anima a documentar esta parte del proceso como un cuerpo por sí solo.

“El taller se centró en las constricciones autoimpuestas, aquellas utilizadas con el único propósito de instigar enfoques alternativos a un problema. (...) Al igual que los andamios, una construcción debía ser instrumental más que significativa. (...) Incluso se permitía introducir errores, después de utilizar con éxito una construcción, para insistir en que el punto consistía en desencadenar un hallazgo y no en cumplir una construcción.”

Enrique Walker

Bajo Constricción (2017)

Ejercicios tontos

La política de producción que se ha seguido en este proyecto de título ha sido una constante en el proceso de egreso (licenciatura, práctica, seminario y título) de la mano de los profesores Casassus y Araya y en compañía con Pablo Schmidt, la que consiste en la reflexionar en torno a objetos producidos con constricciones arbitrarias que no se orientan hacia un fin formal o funcional. La premisa que incita a seguir esta política es que la exploración de una idea llevaría a descubrimientos que difícilmente aparecerían al proponerse un objetivo, los que llevarían a situaciones de interés y satisfacción personal.

Específicamente, seminario y título se realizan bajo la construcción de producir y observar comportamiento físico, la flexión. Metodológicamente, la política se materializa produciendo múltiples objetos que evidencian el comportamiento buscado, formando un catálogo que permita discutir el comportamiento ligado a forma, resistencia, fragilidad,



Figura 1.

Figura 1.

Contraposición de la valoración del producto y su rendimiento contra la motivación del científico. [13]

Figura 2.

PHC habitable presentado en la entrega de título de Pablo Schmidt.



Figura 2.

espacialidad y potencialidad arquitectónica.

Un testamento del trabajo en conjunto y paralelo realizado con Pablo Schmidt bajo esta política se encuentra en “Formulación y análisis de una estructura en flexión activa” (Schmidt y Henríquez, 2019), presentado en la XXI Bial de Arquitectura. En esta se revisan los descubrimientos que se dieron durante el desarrollo del PHC: la necesidad de modelos frágiles y baratos para la comprensión del comportamiento, la importancia de capitalizar sobre el oportunismo de lo inesperado, entender las capacidades de las herramientas que se manejan, etcétera. Pero en particular, se documenta una situación en el que se produjo un prototipo barato, temporal, fácil de transportar, fácil de construir, estético, de valor científico... cualidades que no se buscaban durante la formulación del pabellón. El primer paso en la formulación de este pabellón fue reproducir la técnica de flexión que Pablo presencié en los astilleros de San Juan, Chiloé.

En diversas conversaciones

con Pablo, al comentar publicaciones, artículos y obras en base a flexión activa, la expresión “ejercicios tontos, pero rigurosos” se usó recurrentemente para describir el proceso que distintos autores exponían, donde desde observaciones mundanas respecto a la flexión de un material, se concretaban obras que involucran recursos, tiempo, tecnologías y técnicas.

Una vez que se enfrenta un gran catálogo de objetos producidos a partir de “ejercicios tontos”, llega la hora de definir que se encausa con ésto, cuál es el “producto de salida”. Por supuesto, el producto de salida es una condicionante propia del proceso de titulación, por lo que narrativamente los ejercicios tontos están al servicio la narrativa y validación, si son lo suficientemente rigurosos.

Paradójicamente, en las mismas conversaciones, el interés se centraba en los ejercicios tontos más que en las obras, siendo las últimas las que validaban y permitían hablar de los primeros. En la realidad arquitectónica, todo el trabajo de exploración, por riguroso y complejo que parezca, difícilmente genera interés sin un producto práctico que lo respalde. En la definición del producto final, para este proceso de título, aparecen dos opciones de formalización: proyecto y prototipo.

Proyecto

Este camino consiste en proponer un proyecto de arquitectura que use el panel flector como sistema constructivo, definiendo una problemática arquitectónica, lugar, programa y propuesta. Esta opción se ajustaría de mejor forma al programa que propone la escuela, explorando directamente una aplicación práctica para la idea desarrollada.

Con el desarrollado hasta el momento del Pase de Título, el panel flector ya presentaba características como simplicidad de fabricación, transporte y armado, estando en curso la investigación en cuanto a su rendimiento formal. En contra parte, la falta de un prototipo de escala mínimamente habitable, hace que el planteamiento de un proyecto de

arquitectura suponga grandes especulaciones en cuanto a su realidad constructiva,

Prototipo

La opción del prototipo consiste en realizar un pabellón con el panel flector que lo aproxime a una realidad habitable. Sería la continuación natural del trabajo desarrollado hasta este punto, explorando los problemas de escalamiento y rendimiento formal.

El prototipo presenta problemas técnicos que raramente se enfrentan en los talleres de arquitectura: cubicación, presupuesto, transporte, almacenamiento, accesibilidad a herramientas y lugar de trabajo. Más profundamente, el prototipo es en sí un experimento con eficacia incierta, y como se discutió anteriormente, este producto sería pivote que valida los ejercicios tontos realizados.

El Pase de Título

La comisión conformada por Francis Fenninger y Gabriela García de Cortázar evaluaron *Pase de Título* en agosto del presente año, el que se presentó con seis modelos de tamaño grande pero no habitable y una memoria de cinco libros con láminas.

Ante la pregunta sobre los posibles caminos a seguir, ambos presentaron un interés en cómo se desarrollaría el prototipo en una escala habitable y las problemáticas que esto traería, expresando que el proceso y la misma presentación eran conducentes al desarrollo de un prototipo.

De seguir este camino, se planteó el gran problema constructivo a tratar, entendiendo que cada panel es un elemento estable por sí solo, serían las uniones que permitirían la panelización de una superficie.

Figura 3.

Prototipo de plano tensado de Pablo Schmidt. Se argumenta que es más fácil transmitir interés por el plano cuando se entiende que el PHC habitable (Figura 2) se realiza a partir de este primer modelo.

La experiencia de Pablo Schmidt

La problemática del prototipo como producto final fue uno de los temas de discusión durante el título de Pablo Schmidt.

Un escenario que se podía presentar era que el prototipo no se irguiera como esperado. De hecho, la idea de realizar el seminario como un estudio de su comportamiento era entender lo mejor posible la integridad estructural del prototipo para evitar este escenario.

En el caso que el prototipo no funcionara, Pablo tendría para presentar un gran volumen de modelos de escala no habitable, sin poder corresponderlos con una realidad constructiva. Internamente, se entendía que gran parte del valor e interés del ejercicio estaba en los experimentos y descubrimientos, pero la valoración de su trabajo sería más difícil de transmitir.

Afortunadamente, el PHC habitable funcionó y su ejercicio encontró apreciación por su comisión.

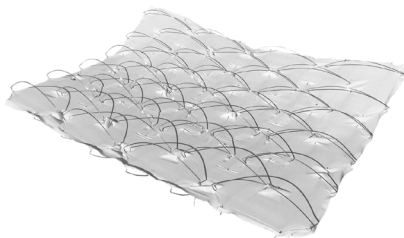


Figura 3.

Hacia el prototipo

Con todo lo anterior, se opta por el prototipo como el producto de salida de este proyecto de título. Al plantearlo, surgen las dos incógnitas más grandes a considerar respecto al panel flector: su factibilidad constructiva a una mayor escala que la probada hasta el *Pase de Título*, y su rendimiento formal.

Estas dos problemáticas podrían comprometer independientemente la factibilidad de un posible prototipo, por lo que se separa en dos con objetivos específicos: uno de escala y otro de forma.

Con lo experimentado hasta el *Pase de Título*, el domo cuadrado parece ser la aplicación de doble curvatura que da mayores garantías de su funcionamiento, por lo que se fija como forma para probar mayores escalas.

Por otro lado, de los modelos prácticos se descubre que los paneles tienen una capacidad formal restringida, definida por el arreglo de sus uniones, lo que supone un problema geométrico complejo. Así, se opta por plantear el prototipo de forma a partir de un modelo digital que simule las uniones de un gran arreglo de paneles ajustados a una geometría no regular. Los resultados de este modelo proveerían las indicaciones para la construcción de un prototipo físico.

El problema de la habitabilidad

Un punto medio entre proyecto y prototipo es la definición de la habitabilidad de sistema: tamaño, cerramientos, iluminación, expresión, etcétera.

Evitando las especulaciones que suponían el desarrollo de un proyecto, muchas de estas definiciones pasan intrínsecamente por las decisiones que se toman durante el desarrollo de los prototipos; en principio, el de escala definirá materiales y dimensiones, mientras que el de forma definirá las posibilidades volumétricas.

La habitabilidad es una problemática que no forma parte del prototipado en sí, ya que estos priorizan completar sus objetivos específicos antes que nada. Aún así, hay una intención en poder explorar su cualidad habitable, ya sea como especulación o aplicación práctica, pero esta intención no se puede comprometer hasta la realización de los mismos.

LIBRO VII

ESCALA

DEL PROTOTIPO HABITABLE

El prototipo habitable consiste en un domo rectangular construido con paneles cuadrados de 120cm de lado, los que se fabrican con de flejes de terciado de 120cm×6cm×3mm. Hasta la edición de esta memoria, se han probado las versiones de 9 (3×3) y 16 (4×4) paneles.

El objetivo de este prototipo concretar un pabellón habitable usando paneles flectores, significando que debe tener una superficie lo suficientemente grande para albergar a una persona (una superficie mínima de 1m² y una altura del orden de los 2m). De los ensayos presentados en este libro, el domo de 16 paneles tiene 23m² de superficie y 1.5m de altura.

Entre las cualidades del prototipo, se encuentra su producción simple (la construcción del panel en sí se realiza cortando con cuchillo cartones y pegando con cola fría, mientras que la instalación de las uniones desmontables entre paneles requiere el uso de un taladro), la posibilidad de transporte a tracción humana (se transporta en bicicleta de a 4 paneles a la vez, y a pie de a 8 a la vez), capacidad de ser desmontado para su almacenamiento, ensamble realizable por una persona (probado hasta el domo de 16 paneles), un peso de 1.1kg por cada panel, a un costo unitario de CLP \$2000 (+CLP \$2000 incluyendo uniones).

Este libro registra el proceso de producción y ensayo del prototipo, así como la proyección de su construcción en veinticinco paneles, lo que implica el diseño de los soportes y el cerramiento.

Figura 1.

Fllejes probados en terciado. La exploración consistió en balancear la división posible del formato, la rigidez obtenida y la probabilidad de fracturas.

- Fllejes de 100cm×10cm.
- Fllejes de 100cm×6cm.
- Fllejes de 120cm×10cm.
- Fllejes de 120cm×6cm.

Materiales y dimensiones

Para el primer aumento de escala del panel, se trató de conservar la idea inicial del papel cortado proyectando paneles íntegros, con la idea de mantener simple la faena resolver inmediatamente el problema del cerramiento. Se evaluó el uso de planchas metálicas accesibles en el centro de Santiago: zincaluminio y aluminio. El aluminio resultó ser ligeramente más caro que la aleación, pero con la mitad de peso, por lo que se probó con éste.

El panel cuadrado de 100cm de lado con 0.8mm de espesor, mostró falencias en la compresión bajo su propio peso, siendo improbable que funcionara en uniones modulares.

Descartando las placas metálicas, se consideró usar fllejes de terciado de 3mm. Se probaron cuatro variaciones: paneles de 100 y 120cm de lado con fllejes de 6 y 10cm de ancho. Aunque las variaciones son pequeñas, el comportamiento óptimo, entre rigidez y colapso, se encuentran

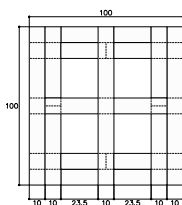


Figura 1a.

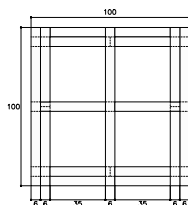


Figura 1b.

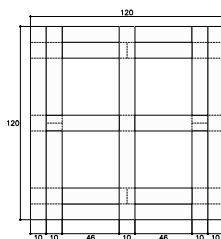


Figura 1c.

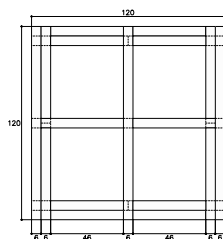


Figura 1d.

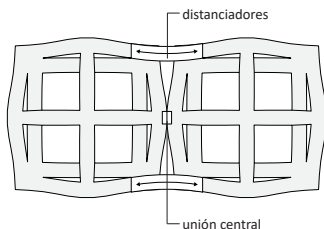


Figura 2.

Figura 2.

Uniones en planta: en el centro el pivote, en los extremos, los distanciadores.

Figura 4.

Distintas configuración de rotación según distanciadores.

Figura 5.

Imágenes de los distanciadores. Son placas de terciado con un riel que permite ajustar la guía insertada en el panel.

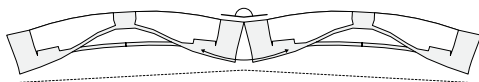


Figura 3a.

en paneles de 120cm de lado y flejes de 6cm.

Uniones

La unión entre dos paneles se realiza en tres puntos: la bisagra central y dos distanciadores que definen el ángulo de apertura.

El proceso de ensamblaje de paneles requiere un continuo ajuste mientras se agregan elementos al conjunto, por lo que es necesario que las uniones se autorregulen según las exigencias de la superficie buscada y el proceso de armado.

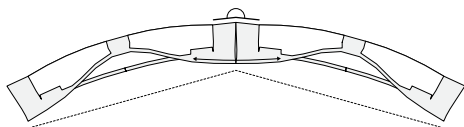


Figura 3b.

Así, el ángulo que describe la bisagra central depende de los distanciadores, los que a la vez se pueden desplazar libremente en una dirección y flexar: son placas de terciado con rieles que se ajustan mediante pernos, los que se ajustan una vez que se encuentra la forma buscada.



Figura 4a.

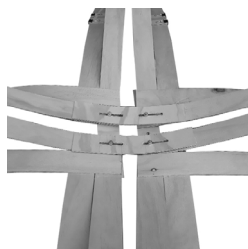


Figura 4b.

Así como los flejes que conforman los paneles se cortan en el sentido de la fibra del terciado para maximizar la rigidez, los distanciadores se cortan en el sentido ortogonal, permitiendo la flexión.

Figura 5.

Uniones para la construcción panel y receptones de otros paneles.

Figura 6.

Irregularidad entre paneles heredadas de la madera. Se nota en este caso que los paneles tienen distintas alturas a pesar de estar contruidos con las mismas dimensiones.

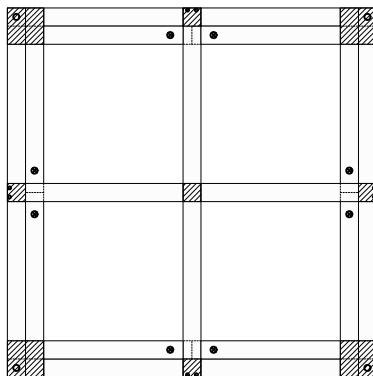
Construcción, transporte y almacenamiento


Entre el punto de construcción y almacenamiento del prototipo hay 7km de distancia, y el medio de transporte a utilizar es la bicicleta, por lo que la construcción se ajusta a este medio.

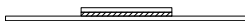
La plancha de terciado de 122cmx244cm se corta en barraca en rectángulos de 61cmx122cm. Cada rectángulo se corta con cuchillo cartonero en diez flejes de 6cm de ancho, y cuatro de estos flejes se cortan en la mitad, para dar forma a los tensores.


El panel se construye encolando los flejes, y una vez aseguradas las posiciones, se perfora para insertar las uniones entre paneles.

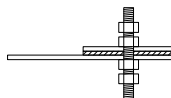
Los tensores tienen unión apernada, por lo que los paneles se pueden desmontar hasta su forma plana (aunque una vez armados quedan con una deformación cóncava) para su transporte y almacenamiento.




 Uniones encoladas entre flejes de panel.




 Unión apernada entre maneles. Pasador ajustable. Hilo y tuercas de 1/4".



 Unión apernada entre tensores de un panel. Perno y tuercas de 1/4".



 Unión articulada entre paneles. Bisagras de 2" y pernos de 1/8".

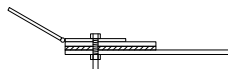


Figura 5.

Figura 7.

Imagen del arco formado por 6 paneles, el que alcanza una altura suficiente como para definir un espacio habitable. Es posible agregar un séptimo panel, pero definiría un arco sostenido por un ángulo mayor a 180° , necesitando el diseño de una base o un ajuste en el ángulo entre paneles.

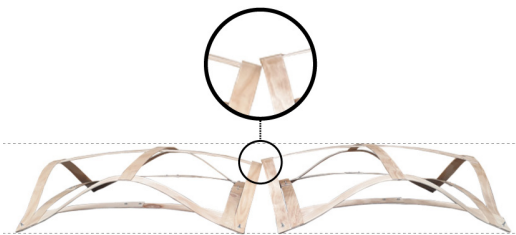


Figura 6.

Ensayo de arco

El primer ensayo consiste en la formación de un arco, la agrupación más simple y estable de los paneles.

Usando seis de estos, y sin apoyos fijos en el piso, se alcanzan fácilmente los dos metros de altura. La estructura es estable, pero presenta oscilaciones ante perturbaciones a lo largo del arco.



Figura 7.

Figura 8.

Domo de 3x3 paneles desarmado para su transporte.

Figura 9.

Domo de 3x3 paneles extendido y ensamblado.

Figura 10.

Llegada a piso del domo de 4x4 paneles. El peso fuerza a los extremos a doblarse para optimizar la sección eficaz.

Ensayo de domo

El domo rectangular se probó en su versión de 9 y 16 paneles. Con el primero se aprendió que lo óptimo es armar los bordes para luego completar y ajustar en el interior.

En el primer ensayo con 16 paneles, se unieron los periféricos entre bisagras, con la idea de luego ajustar los distanciadores y erguir el modelo, pero la dependencia estructural forzó las uniones en distintos sentidos mientras se agregaban elementos, terminando por romperse.

En el segundo ensayo, las patas se armaron y ajustaron por separado, para luego unir entre ellas. El armado del interior del domo requirió múltiples ajustes del conjunto, pero se armó exitosamente.

El modelo se dejó armado dos días y se sometió a perturbaciones, sufriendo fracturas en las zonas de llegada a piso. Hasta este punto se necesita solo una persona y medios de apoyo para el armado.

Figura 11.

Fracturas asociadas a los paneles de llegada a piso. Se evidencia la necesidad de un refuerzo en estas secciones.

Figura 12.

Secuencia de armado del domo de 4x4 paneles. Primero se aseguran las llegadas a piso asegurando solo los distanciadores exteriores. Luego se arman el un par de arcos, los que luego definen el borde del domo. Se termina agregando los paneles interiores.

**Figura 8.****Figura 9a.****Figura 9b.****Figura 10.****Figura 11.**

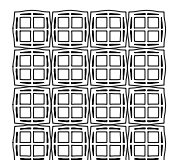
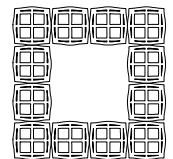
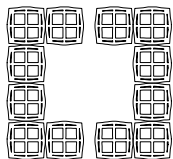
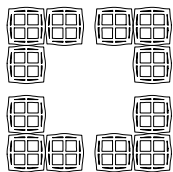


Figura 12.

Figura 15.

Estudio del panel bajo compresión. Superior: fuerza aplicada en la unión central. Inferior: fuerza aplicada en la unión de distanciadores. En el primer caso, lo el panel responde a la compresión ligada al nudo antagonista, y el nudo central impide deformaciones. En el segundo caso, el tensor y compresor responden desde su punto menos efectivo, produciendo la deformación del panel.

Llegada a piso y el domo de 5x5 paneles

El domo de 4x4 paneles deja en claro que el material en estas dimensiones no aguanta su peso llegando en cuatro patas.

Correspondiendo con la categoría de estructura de auto-equilibrio, el prototipo distribuye sus esfuerzos en paralelo a la forma que describe, por lo que su descarga debería se acorde a esta forma.

Estudiando la capacidad de compresión del panel y la estabilidad del arco, se llega a la conclusión de que la descarga se debería centrar en la definición del perímetro más que en los puntos de llegada a piso. Específicamente, el punto ideal de descarga sería el de unión central.

Así, para avanzar con el domo de 5x5 paneles es idear un soporte para la llegada a piso que comprima el perímetro de la superficie.

Figura 16.

Estudio de la estabilidad del arco: este transmite los esfuerzos a lo largo de la superficie de los flejes, lo que por su configuración se alinean con la descarga del peso, haciendo el conjunto estable.

Figura 17.

Estudio de descarga del domo: si el perímetro se apoya en los puntos centrales, cada sección se comportaría como un arco.

Figura 18.

Ensayo realizado con un modelo de raulí, con paneles de 50cm de lado, formados en un domo de 4x4. El modelo se apoya en 8 machones apoyan las uniones centrales, liberando los esfuerzos en las esquinas. El domo crece en un 4% de altura en comparación al caso sin machones, y gana estabilidad.

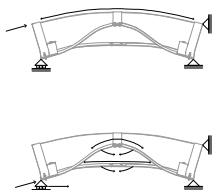


Figura 13.



Figura 14.

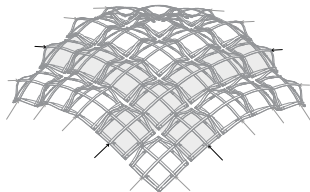


Figura 15.

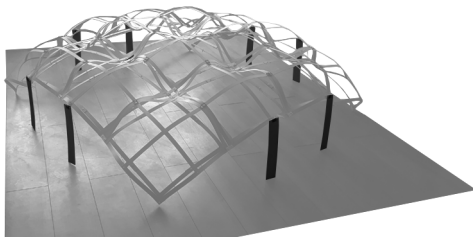


Figura 16.

DEL PROTOTIPO DE FORMA LIBRE

El prototipo de forma libre consiste en una superficie irregular panelizada regularmente utilizando cuadrados de 50cm de lado, los que se construyen a través de flejes de raulí de 50cmx2cmx1mm. Debido a la complejidad geométrica que supone panelizar analíticamente una forma libre a través de paneles cuadrados regulares, se desarrolla un programa que simula la caída de paneles sobre una superficie minimizando la distancia entre ellos. Con este ajuste de paneles, el programa calcula y modela las uniones entre ellos, sirviendo como guía de construcción. Hasta la edición de esta memoria, se ha realizado una séptima versión del programa y se ha probado forma libre con un arreglo de 9 paneles.

El objetivo de este prototipo es formar una estructura de doble curvatura. Después de la realización de estudios prácticos y digitales, se concluye que los paneles tienen que ser lo suficientemente grandes para trabajar uniones con una precisión de medio centímetro, y una material que dé garantías de que los flejes reacciones uniformemente.

Este prototipo tiene dos partes: estudio geométrico y construcción. El estudio geométrico consiste en idear una panelización lo más regular posible, considerando que la flexibilidad del panel flector puede absorber pequeños errores. Este estudio daría una guía para la construcción de la estructura, el que tendría características similares al prototipo de escala en cuanto a simplicidad de transporte, desmontabilidad, almacenamiento y armado, con un peso de 80g por panel, al costo de CLP\$1800 cada uno.

El prototipo pretende explorar el valor del panel flector como sistema constructivo, creando una forma irregular a partir de paneles regulares, donde las deformaciones son asumidas por las uniones entre ellos y las deformaciones internas de cada panel. Este libro registra el proceso de producción y ensayo del prototipo en su fase geométrica y en la etapa inicial de su construcción.

Figura 1.

Modelo de pino de forma cónica, se compone de tres arcos que se intersectan entre ellos.

Figura 2.

Exploraciones en aluminio del principio de arcos que se intersectan, con paneles de 10cm de lado.

Figura 3.

Panelización analítica.

a. Superficie

b. Panelización con 16 paneles.

c. Panelización con 2500 paneles.

El método utilizado divide la superficie en cuadrángulos a partir de la división de una métrica interna. Este método presenta tres problemas al tratar de asimilarlo al panel flector: la fidelidad del ajuste es proporcional al número de paneles, los que no son planos ni cuadrados regulares.

Acercamiento empírico

El primer acercamiento a una forma no regular se realizó explorando uniones por patrón que ensamblara formas cónicas.

La experimentación se realizó con paneles de pino (60cm de lado) y aluminio (10cm de lado). Con los paneles de pino se obtuvo la forma básica de unión que maximizaba el volumen contenido (Figura 11 del LIBRO IV), mientras que los de aluminio revelaron las limitaciones de este patrón (es difícil salir de la forma esférica) y la necesidad de una escala mayor para trabajar con uniones diferenciadas.

Las uniones revisadas en el LIBRO IV son definidas por un criterio práctico simple, siendo fáciles de controlar, pero dando como resultado formas simples. Para formas irregulares, las uniones son las que asumen la irregularidad, y como estas son reactivas entre unas y otras, son difíciles de diseñar manualmente.

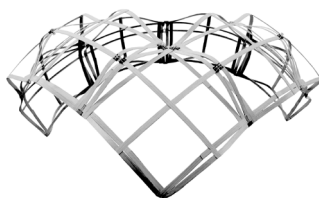


Figura 1.



Figura 2a.



Figura 2b.

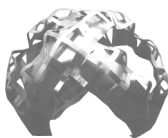


Figura 2c.



Figura 2d.

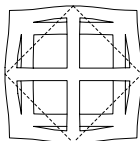


Figura 4.

Figura 4.

Aproximación de un panel flexor a un cuadrado. En este caso, lo que importa es conservar el plano que describe el punto central que entra en contacto con los otros paneles.

Figura 5.

Panelización por simulación.

- Definición de paneles previo a dejarse caer sobre la superficie.
- Paneles en reposo después de caer.
- Paneles flexores interpolados con los diamantes referenciales.

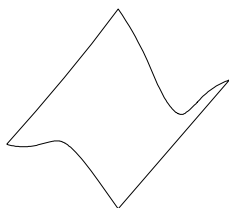


Figura 3a.

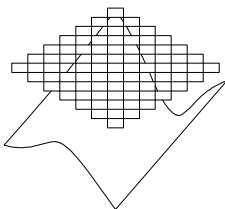


Figura 5a.

Acercamiento digital

En el LIBRO IV, la forma procedía de la definición de uniones. Para la forma libre se plantea hacer lo inverso: imponer una forma y a partir de ésta extraer las uniones necesarias.

Formalmente, el trabajo consistiría en panelizar una superficie en cuadrados regulares y medir la rotación de cada panel respecto a sus vecinos. A partir de esta medición, se podrían definir los distanciadores necesarios para definir la geometría.

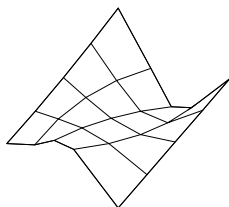


Figura 3b.

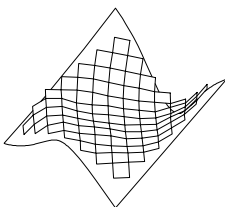


Figura 5b.

Ahora bien, la panelización de una superficie (Figura 3) irregular tiene el problema que la fidelidad se logra con el incremento de la diversidad de paneles (curvatura, área y ángulos), en una situación donde se busca la panelización mediante cuadrados regulares.

Aquí, nuevamente se plantea invertir un proceso: en lugar de panelizar a partir de la geometría de la superficie analíticamente, se fuerza una geometría cuadrada, la que se deja caer sobre la superficie objetivo.

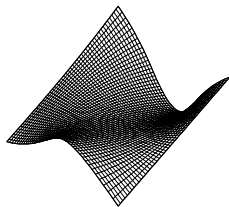


Figura 3c.

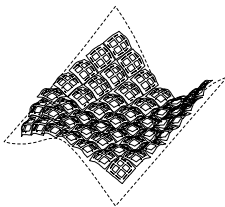
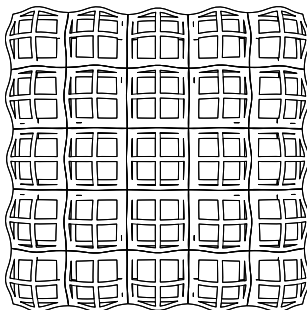


Figura 5c.

Figura 6.

Plantas cubiertas del prototipo habitable. Superior: simulación de los paneles tensados simultáneamente por los distanciadores. Inferior: simulación de los paneles ajustados por caída a la superficie.

La caída se geometriza mediante simulaciones físicas, teniendo dos problemas: la fidelidad de la forma es mucho menor que la panelización analítica y la simulación en sí implica pequeñas deformaciones. El primer problema es uno práctico que se debe resolver estudiando qué superficies son óptimas para este método y cuales no. El segundo problema se soluciona al considerar la flexibilidad de los paneles, los que pueden absorber deformaciones hasta cierto rango, lo que se puede calibrar en el programa.



Ensayo con el domo habitable

Para probar la utilidad del programa, se ensayó con un modelo ya probado en dos libros anteriores: el domo simulado por tensión de distanciadores (LIBRO IV) y el domo ajustado por caída de paneles (LIBRO VII).

En la Figura 6, la imagen superior corresponde a una simulación del domo armado desde el plano, tensando las uniones. La imagen inferior corresponde a una aproximación por caída, dando información de las uniones de cada punto.

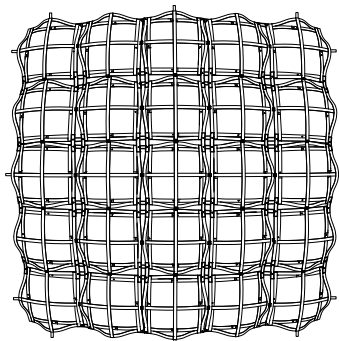


Figura 6.

Figura 7.

Superficie ajustada por caída y las normales de los paneles.
a. Isométrica.

b. Vista en perspectiva. Se destaca una de las columnas: las normales ya no se encuentran en un mismo plano, lo que implica que, en el caso de una superficie con curvatura en dos sentidos, la unión central entre paneles no puede ser una bisagra, tiene que poder torcerse.

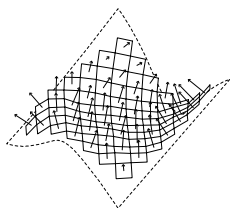


Figura 7a.

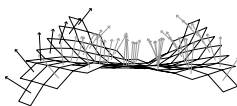


Figura 7b.

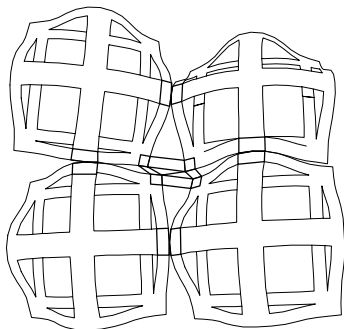


Figura 8.

Figura 8.

Cuatro paneles dentro de una configuración de forma libre. Las uniones centrales se tuercen entre ellas, y los distanciadores entre los cuatro describen un polígono.

Uniones en forma libre

Los estudios con el programa llevan a concluir que para doble curvatura en direcciones opuestas, es necesario que, a diferencia del prototipo habitable, la unión central se pueda torcer y que los distanciadores salgan del plano.

Otra diferencia son los distanciadores: estos ya no operan en un plano y deben tener una posición fija en el espacio (en el prototipo de escala, son ajustables). Estas restricciones llevan a pensar en los distanciadores entre cuatro paneles como un polígono triangular de cuatro lados que conecte todas las esquinas entre ellas, restringiendo las distancias relativas.

Las uniones centrales regulares, pero tienen la complejidad de tener que ser rígido en su longitud, pero poder torcerse, por lo que se prueban distintos plásticos. Los distanciadores son rígidos y distintos, por lo que se programa el simulador para que los exporte de forma que se pueda cortar en láser en algún cartón rígido

Figura 9.

Calibración del panel de simulación con el construido. Basta con calibrar los cuatro arcos que forma el panel (largo de fleje, alto y distancia entre los extremos).

Figura 10.

Panel contruido.

Figura 11.

a. Distanciadores como flejes.

b. Distanciados como polígono y fleje.

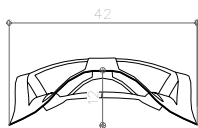


Figura 9a.

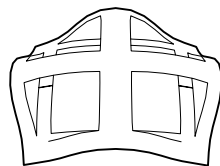


Figura 9b.

Materialidad, escala y calibración

Los experimentos con los paneles de aluminio y el programa dirigen hacia la necesidad de generar una gran cantidad de paneles, que se puedan deformar sin quebrarse y ser de una escala lo suficientemente grande para trabajar con distanciadores precisos.

En este sentido, los paneles de pino usados en la primera etapa de este proyecto parecían ideales, pero responden irregularmente a las flexiones, quebrándose inesperadamente. Se eligió usar flejes de rauli de 50cmx2cmx1mm, los que son notoriamente más flexibles y regulares, permitiendo además mayor curvatura que los paneles de pino a pesar de tener menores dimensiones.

Las uniones centrales se hacen con tiras de caucho, las que permiten torcer los paneles entre ellos. Los distanciadores se realizan con cartón madera, al ser rígido, pero cortable con cuchillo cartonero y láser.



Figura 10a.



Figura 10b.



Figura 11a.

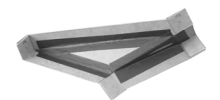


Figura 11b.



Figura 12.

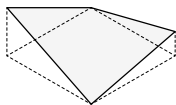


Figura 13a.

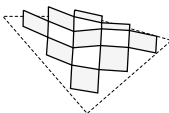


Figura 13b.

Figura 12.

Aplicación del distanciadore poligonal y uniones centrales de caucho, los que permiten rotación.

Figura 13.

Superficie y panelización.

Figura 14.

Paneles y distanciadores necesarios para obtener la forma.

Figura 15.

Distanciadores poligonales computados.

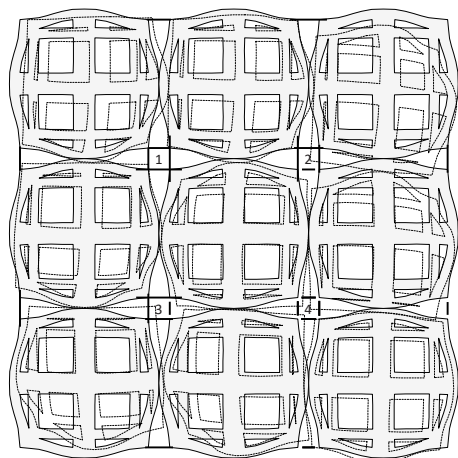


Figura 14.

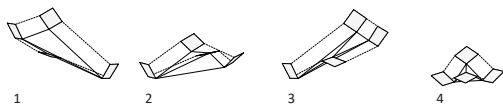


Figura 15.

Ensayo de forma libre de 3x3 paneles

Los ensayos de forma libre mostraron la complejidad que supone el sistema de apoyos. Más aún, los problemas de estabilidad del prototipo habitable se resolvieron con la observación de la estabilidad del prototipo de forma.

Los paneles se deben apoyar de forma que se formen arcos que se soporten entre ellos, siendo más complejo que la estabilidad del domo, ya que no son puramente perimetrales.

Los primeros dos ensayos se realizaron con configuraciones entre cuatro paneles, los que funcionaron bien con distanciadores de fleje (Figura 11a). El aumento de paneles requirió que los distanciadores se comportaran como una unidad, por lo que se poligonizaron completamente (Figura 11b). El ensayo que se presenta en la Figura 15 es el cuarto ensayo que forma libre de 3x3 paneles, resolviendo problemas de estabilidad y materiales de los primeros tres ensayos.

Figura 17.

Modelo y construcción del prototipo de forma libre.

a. Modelo digital.

b. Construcción de los apoyos.

c. Ensamble de paneles.

d. Cerramiento de la estructura con tela.

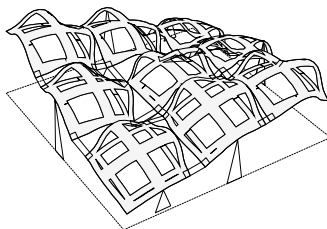


Figura 17a.

La construcción del ensayo requiere el trazado de la base y el posicionamiento de los apoyos perimetrales (el peso no es suficiente para necesitar apoyos centrales). El ensamble entre paneles parte desde los apoyos fijos, necesitando otros intermedios que se van sacando conforme se arma la estructura.

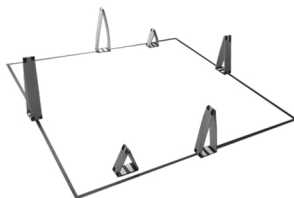


Figura 17b.

Finalmente, la superficie se cierra tensando una tela en la base de los paneles, describiendo una superficie única más próxima a la objetivo (Figura 13a).

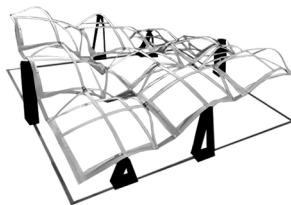


Figura 17c.

Para ensayos de mayor envergadura se necesita estudiar los apoyos interiores siguiendo el criterio de estructurar arcos, como en el prototipo habitable.

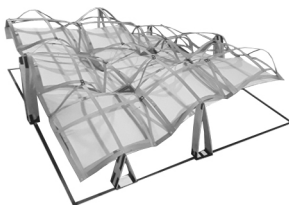


Figura 17d.

LIBRO B

CONCLUSIÓN

CONCLUSIÓN

En este proyecto de título se formula un sistema constructivo en base a paneles regulares que funcionan por flexión activa: parten como objetos rígidos planos, que al tensarse sobre sí mismos, ganan volumen y resistencia a la compresión en algunos sentidos específicos. De acuerdo a estas resistencias específicas, se establece un criterio de ensamble entre paneles, los que pueden formar distintas superficies según las uniones entre ellos.

La formulación del sistema se realiza mediante la exploración empírica de modelos de papel, cartón, aluminio y madera, los que se desarrollaron buscando comprender la flexión de un plano rígido en más de una dirección. Este objetivo de búsqueda se entiende como una construcción arbitraria, una generatriz para el desarrollo de modelos; no se compromete como parte del producto final, sino como la idea que pone en marcha el proceso. En efecto, el panel flector no opera estrictamente como una superficie única flectada, sino que la descompone en flejes de direcciones ortogonales que forman arcos resistentes.

El producto de salida de este proyecto son dos prototipos, uno que testea la capacidad del panel flector para estructurar un espacio habitable y otro que explora la versatilidad formal del sistema constructivo. Hasta la edición de esta memoria, ambos prototipos están en construcción y cuentan con algunos ensayos preliminares: el prototipo de escala habitable se ha probado en un 64% de su tamaño final, teniendo que resolver problemas de llegada a piso y llegar a una adecuada. Por otro lado, el prototipo de forma consta de una etapa de formulación geométrica y otra de construcción. La formulación geométrica consiste en el desarrollo de un programa que paneliza una superficie objetivo, calcula las uniones, las modela e imprime, dando paso a la etapa de construcción. Actualmente el programa se encuentra funcional en su séptima versión, mientras que se ha ensayado la construcción en un 18% de tu tamaño final.

El proyecto se planteó el objetivo de diseñar una estructura en base a flexión activa que fuera arquitecturizable. Aún se esperan los resultados de los prototipos, pero se considera que el proceso bien encaminado: se plantea un sistema de panelizado en el que los paneles son regulares, fáciles de transportar y construir, donde la complejidad geométrica que implica una intención formal se releva a las uniones entre ellos.

Este trabajo deja tres líneas de investigación abiertas en cuanto al desarrollo del sistema: aplicación, materialidad y refuerzos.

La aplicación es sin duda uno de los puntos que necesita un mayor desarrollo. Como se discute en el libro LIBRO VI, este proceso se priorizó estudiar la integridad estructural y las posibilidades formales del sistema. Aspectos como cierre, uso y habiente son cualidades que quedaron en el terreno especulativo, pero con nociones claras que se discuten en los LIBROS IV y V.

La materialidad ha sido un eje fundamental en el desarrollo del panel flector, el que se formuló, exceptuando los prototipos finales y un modelo de aluminio, utilizando materiales reciclados y de fácil acceso. Como la literatura sugiere, las estructuras de flexión activa requieren de materiales de propiedades elásticas específicas (lejanía entre el punto de deformación plástica y punto de rotura). Si bien la madera fue el material predilecto de prototipado, hay otros que se dejaron fuera por la dificultad técnica que implica su uso, como plástico o acero, los que ampliaría las posibles aplicaciones del sistema.

Por último, el diseño de panel tiene deficiencias claves frente a ciertos esfuerzos de compresión, como los diagonales. Con el entendimiento que se obtiene de los prototipos finales, ciertas alteraciones al panel comienzan a plantearse con el fin de optimizarlos estructuralmente, pero es un eje que en este proceso no se desarrolló por constricciones temporales.

IMÁGENES

- [1] "Structure systems" (Engel H., 1967).
- [2] "Research, development and daring – Frei Otto wins the Pritzker Prize" (Mueller N., Details, 2015).
- [3] "Active bending, a review on structures where bending is used as a self-formation process" (Lienhard et al, 2013).
- [4] Recuperada de mannheim-multihalle.de
- [5] Recuperado de icd.uni-stuttgart.de/?p=4458
- [6] "Descripción de una estructura híbrida formada por active bending: aproximaciones al desarrollo de un modelo estructural" (Henríquez, A., 2018)
- [7] "Formulación y Análisis de una Estructura de Flexión Activa, Reflexionar produciendo con elementos ordinarios" (Schmidt, P. y Henríquez, A., 2019)
- [8] Recuperado de bamboo-earth-architecture-construction.com/portfolio-item/panyaden-international-school-sports-hall/
- [9] "MOOM, Tokio, Japón" (Kojima K., ARQ, 2011).
- [10] "Desde la impresión hecha memoria a la memoria hecha material" (Schmidt P., 2018).
- [11] Recuperada de temoore.net/fifties/plywood-dome/
- [12] Recuperada de ga-ada.co.jp/english/ga_other/plot_004.html

REFERENCIAS

- Fund, A. I. (2008). *Form-finding structures* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- Henríquez, A. (2018). *Descripción de una estructura híbrida formada por active-bending, aproximaciones en el desarrollo de un modelo estructural*.
- Knippers, J. (2013). *From model thinking to process design*. Architectural design, 83(2), 74-81.
- Lienhard, J., Alpermann, H., Gengnagel, C., & Knippers, J. (2013). *Active bending, a review on structures where bending is used as a self-formation process*. International Journal of Space Structures, 28(3-4), 187-196.
- Lienhard, J. (2014). *Bending-active structures: form-finding strategies using elastic deformation in static and kinetic systems and the structural potentials therein*.
- Schmidt, P. (2019). *Una memoria hecha material*.
- Schmidt, P. & Henríquez, A., (2019). *Formulación y Análisis de una Estructura de Flexión Activa, reflexionar produciendo con elementos ordinarios*. XXI Bienal de Arquitectura 2019.
- Walker, E., (2017). *Bajo construcción*. Ediciones ARQ.

