

EXPERIMENTACIÓN DE LA MATERIA COMO GENERADORA DE LA FORMA Y EL ESPACIO

Tesis que para obtener el título de arquitecto presenta:
PAOLA TOVAR LUJÁN

Sinodales:

Arq. Francisco Hernández Spínola
Dr. en Arq. Juan Ignacio del Cueto Ruiz - Funes
Arq. Eric Valdez Olmedo

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ARQUITECTURA
TALLER MAX CETTO

Cd. Universitaria, D.F. Octubre 2015





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

A papá

Por dejarme perseguir mis sueños

A mamá

Por su apoyo y motivación diaria

A mis hermanas

Por ser mi ejemplo de lo que significa el éxito

A Yoshi

Por mostrarme infinitas posibilidades de seguir adelante

A mis asesores

Por su tiempo y paciencia hacia este tema de tesis

A Eric

Por su ayuda, asesorías y prestarme a sus

alumnos para poder construir el pabellón

ÍNDICE

| | | | | | |
|------------------|--|--|---|------------------------|---|
| 1- INTRODUCCIÓN | 2- LAS ESTRUCTURAS LIGERAS Y SU RELACIÓN CON EL MATERIAL | 3- CARACTERÍSTICAS E INNOVACIONES DE GRID SHELLS | 4- CONSTRUCCIÓN DE PABELLÓN EXPERIMENTAL | 5- CONCLUSIÓN | 6- ANEXOS |
| I Fundamentación | 2.1 Comienzo de las estructuras ligeras | 3.1 Conceptos Básicos | 4.1 Planteamiento del pabellón | 5.1 Conclusión general | Registro fotográfico del proceso de montaje |
| II Hipótesis | 2.2 Grid Shells | <ul style="list-style-type: none">– Retícula y barras– Uniones– Nodo– Diagonales– Fijación al suelo– Cubierta– Montaje | 4.2 Selección del sitio | | Glosario |
| III Objetivos | 2.3 Búsqueda de la forma <ul style="list-style-type: none">– Modelos analógicos– Método de la cadena colgante– Modelos digitales– Simulaciones en Grid Shells | 3.2 Casos de estudio <ul style="list-style-type: none">– Línea del tiempo– Descripción y análisis de ejemplos seleccionados:<ul style="list-style-type: none">MannheimJapan PavillionDownland M.Toledo Grid ShellPortal of AwarenessDigital Techtonics | 4.3 Proceso de diseño y geometría | | Referencias fotográficas |
| | 2.4 La relación con el material | | 4.4 Búsqueda de la forma | | Bibliografía |
| | 2.5 Conclusión | 3.3 Tabla comparativa | 4.5 Simulaciones digitales y modelos analógicos | | |
| | | 3.4 Conclusión | 4.6 El material, madera de pino | | |
| | | | 4.7 Construcción del pabellón experimental | | |
| | | | 4.8 Problemáticas | | |
| | | | 4.9 Resultado | | |
| | | | 4.10 Aplicaciones en arquitectura | | |
| | | | 4.10 Conclusión | | |

CAPÍTULO

01

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Este trabajo de investigación tiene su origen al cursar la materia “Experimentar la materia” impartida por M. Le Roy en la Universidad ENSA Paris- Malaquais.

El objetivo de la asignatura es preparar a los alumnos a una práctica de innovación de técnicas en el desarrollo del proyecto arquitectónico. Se enfoca en la influencia de los materiales y tecnologías para minimizar el impacto ambiental.

Para este trabajo de tesis se toma como caso de estudio las Grid Shells, por su poca divulgación, por la oportunidad de dar a conocer este tipo de estructuras, por los retos que representa la búsqueda de la forma y su interacción con el material.

La relación entre forma- fuerza y materia es planteada por Frei Otto, por primera vez mientras trabajaba en el Instituto de estructuras ligeras, como un intento de clasificar y describir los tipos de estructuras que existen.¹

Los acercamientos para clasificar estructuras varían de acuerdo al enfoque que se busca en la investigación. Se comienza con la forma, ya que el primer acercamiento con el objeto es a través de la percepción de la geometría, la forma determina la habilidad de transmitir o soportar las cargas (fuerza), considerando que se debe emplear el mínimo de material y energía para su construcción.

FORMA - FUERZA - MATERIA son conceptos que no pueden separarse en el ámbito de la construcción. El resultado formal de “**la forma**” constantemente es más importante que la lógica del proceso que lleva hacia éste . En la actualidad utilizamos los **materiales** que “están a nuestro alcance”, los que cumplen con el concepto del proyecto, no se le da la importancia a las propiedades y capacidades de éstos. Todas las obras en arquitectura implican (consciente o no) una interacción entre el diseño y el material.

El desarrollo de estructuras ligeras, cuyo principio es la optimización, se fundamenta en la relación forma - fuerza - materia, respondiendo a una demanda de ahorro de material, tiempo y costo. Las superficies estructuralmente estables, como es el caso de la estructuras ligeras, pueden ser muy eficientes si se diseñan con base en el entendimiento de principios estructurales (**fuerza**) e igualmente problemáticas si no son bien entendidas.²

1 Otto, Frei (1992), IL 23 Konstruktion, Form- Kraft- Masse. Ein Vorshlag zur Ordnung und Beschreibung von Konstruktionen.

2 Bechthold, Martin (2008), Innovative surface structures, technologies and applications.

INTRODUCCIÓN

La finalidad de éste trabajo es enfocarse en las técnicas de materialización fundamentándose en una construcción lógica. Se busca enfatizar el potencial de una forma resistente a través del entendimiento de conceptos estructurales, maquetas análogas y simulaciones digitales como métodos para la búsqueda de la generación de la forma.

FUNDAMENTACIÓN

Las Grid Shells son estructuras poco usadas en la arquitectura que permiten explorar la materialidad y la forma. Como afirma Jörg Schlaich “Los arquitectos y los ingenieros cada vez se han vuelto más flojos para diseñar y construir”³, por lo que es importante retomar éstos temas en la práctica.

En la fase de diseño es más importantes entender los conceptos estructurales para la generación de la forma que la interpretación de fórmulas y cálculos que validan la estabilidad, para poder tener un proceso coherente de construcción.

Debido al auge del diseño asistido por computadora en arquitectura es más sencillo relacionar estas herramientas en la búsqueda de la forma a través de simulaciones digitales del comportamiento de la materia en tiempo real.

HIPÓTESIS

La poca explotación de la construcción de Grid Shells se debe a la forma poco convencional y a la dificultad que representaba demostrar la estabilidad estructural, a pesar de contar con características que permiten optimizar el trabajo.

El diseño bajo los conceptos de forma, materia y estructura potencializan el objeto arquitectónico, además de tener un ahorro en costos, material, y tiempos de construcción.

La búsqueda de la forma como proceso de diseño tiene como resultado un proyecto donde la determinación de la forma, diseño constructivo y montaje responden a las intenciones de la forma.

3 Bechthold, Martin (2008), Innovative surface structures, technologies and applications.

INTRODUCCIÓN

OBJETIVOS

Dar a conocer las ventajas de construir cubiertas ligeras para comprender y divulgar el avance generado gracias al desarrollo tecnológico en este campo.

Distinguir entre los conceptos de la forma por la forma y estructuras que responden a un proceso de optimización para lograr un diseño coherente con el material y la manera de construir.

Dividir en sus componentes ejemplos construidos de Grid Shells para lograr la clasificación de cada uno de ellos con parámetros similares.

Definir cuáles son los conceptos en los que se basan las Grid Shells para lograr un diseño optimizado, en lo que se refiere a ahorro de material, costos y tiempo en la construcción de Grid Shells.

SÍNTESIS

A lo largo de los capítulos se habla de los conceptos de forma fuerza y materia, el orden en el que están presentados se basa en relación con el diseño y construcción de Grid Shells, sin embargo la importancia de los tres es igual.

El capítulo inicial plantea la historia de las estructuras ligeras y cómo han evolucionado hasta el desarrollo de las Grid Shells, la influencia que ha tenido el material y los avances tecnológicos para su posible desarrollo.

Para el diseño y entendimiento del comportamiento estructural se desarrollan una serie de modelos (análogos y digitales), basándonos en superficies de doble curvatura, teniendo como ejemplo las propuestas desarrolladas por Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart.

El segundo capítulo está enfocado hacia una breve revisión histórica sobre Grid Shells, para saber qué es lo que se ha hecho y entender lo que sucede entre la primer Grid Shell conocida diseñada por Frei Otto en 1975 hasta la segunda más conocida en el año 2000, el pabellón Japonés en Alemania de Shigeru Ban.

Se analizan los principales materiales usados en la construcción de Grid Shells, según sus ventajas, usos, resistencia, entre otros. Teniendo como antecedente los problemas mecánicos que representa su construcción en madera, pero valorando factores como resistencia, rigidez, e impacto ambiental.

Gracias a la oportunidad del Arq. Eric Valdez, profesor de la asignatura de construcción del taller José Villagrán, se tuvo la posibilidad de construir un pabellón experimental, mismo que serviría de base para comprobar las hipótesis, poder comparar los modelos (análogos y digitales) realizados con el objeto construido y entender los conceptos estructurales básicos para la generación de la forma.

CAPÍTULO

02

LA FORMA Y SU RELACIÓN CON EL MATERIAL

COMIENZO DE LAS ESTRUCTURAS LIGERAS

El término “construcción ligera” se refiere a las estructuras de membrana textil, cascarones, neumáticas y de cable que en la búsqueda de la forma llegan a una superficie en equilibrio con el mínimo de material, tomando en cuenta para su fabricación las características de los materiales con los que serán construidos.

A lo largo de la historia, con mayor desarrollo en ingeniería, se ha tratado de cumplir el reto de cubrir grandes claros con el menor número de apoyos, o sin apoyos intermedios. En los últimos años se ha explorado construir con materiales y superficies adaptables a las condiciones del contexto en el que se encuentran (clima, fuerzas, etc.). Éstos avances comenzaron con la revolución industrial, con la creación de nuevos materiales las técnicas de construcción fueron mejoradas.

En la segunda mitad del siglo XIX con la revolución industrial inició un proceso de transformación económica, social y tecnológica que inició en Inglaterra, extendiéndose en gran parte de Europa y Estados Unidos.¹ La revolución Industrial marca un punto de inflexión en la historia, modificando e influenciado todos los aspectos de la vida cotidiana en distintas maneras. Es el comienzo de muchas industrias cuyo impacto se vería reflejado en los tiempos de producción.²

La aparición de nuevas técnicas en la construcción está íntimamente ligada a la creación de nuevos materiales, el material que tuvo gran impacto en el siglo XIX en arquitectura y hasta la fecha es la aparición del hierro.

El hierro gradualmente comenzó a tener mayor uso en la arquitectura, conforme se aceptaba y experimentaba con las propiedades y características del material. En la construcción el hierro forjado generalmente se utilizaba en combinación con otros materiales. En 1851 Joseph Paxton diseña y construye El Palacio de Cristal, siendo en sí mismo un avance tecnológico, ya que por primera vez el hierro es utilizado como una estructura que logra cubrir grandes claros con el mínimo de apoyos. Las dimensiones que tuvo el Palacio de Cristal fueron 564m de largo y 39m de altura, con una superficie total de 92,00 m², espacio que se utilizaría para exhibir los avances tecnológicos de la revolución industrial³.

1 McCloskey, Deidre (2004). Roderick Floud y Paul Johnson, ed. Review of The Cambridge Economic History Of Modern Britain. Times Higher Education Supplement.

2 Lucas, Robert E. (2003). The Industrial Revolution Past and Future.

3 “The Crystal Palace of Hyde Park”. Retrieved 4 April 2008.

Se desarrollaron varios ejemplos donde el hierro se usaría como el esqueleto (estructura) cuyo complemento sería el vidrio. El siguiente paso fue la creación del acero, aleación de hierro y carbono, en diferentes proporciones, que, según su tratamiento, adquiere especial elasticidad, dureza o resistencia⁴. Las primeras aplicaciones fueron en la construcción de vías férreas y puentes.

La arquitectura del siglo XIX estuvo ampliamente basada con la creación del hierro, primero como hierro fundido, después como hierro forjado, más tarde como acero. Hacia el final del siglo, se combinó el hierro con un nuevo material, el cemento, es entonces cuando el concreto armado apareció como alternativa.⁵ Su desarrollo originó un cambio en la industria de la construcción, comparable con el impacto que tuvo el uso del hierro y el acero en el ámbito de las estructuras.⁶

CASCARONES DE CONCRETO

Las estructuras de cascarón, generalmente de concreto, son superficies tridimensionales caracterizadas por soportar su peso propio y las cargas externas a las que son sometidas gracias a su forma con curvatura gaussiana positiva, negativa, o nula. Una de las particularidades de los cascarones es el grosor final, éste es mínimo comparado con los grandes claros que pueden lograrse. En México tuvieron gran importancia los cascarones de concreto por su ligereza y calidad estética, desarrollados principalmente en la década de los 50's por el arquitecto Félix Candela influenciado por arquitectos como Eugene Freyssinet en Francia, Robert Maillart en Suiza y Eduardo Torroja en España.⁷

La rigidez necesaria que necesita el cascarón para soportar las cargas externas es proporcionada por su propia forma. El ejemplo más común de cascarones es el paraboloides hiperbólico, cada parte del cascarón es estructural y estructuralmente actúa de esta manera, teniendo sólo esfuerzos de compresión, son geometrías autosoportantes, tanto en el proceso de construcción como una vez que está construida, esto significa que no necesita de refuerzos que lo complementen para mantener su forma.⁸

4 [Http://lema.rae.es/drae/?val=Acero](http://lema.rae.es/drae/?val=Acero) [Fecha de consulta: 07 marzo 2015]

5 Pevsner, Nikolaus (2006), An outline of European Architecture, Harmondsworth.

6 Del Cueto Ruiz-Funes, Juan Ignacio, (2012), La "piedra del siglo xx" en la arquitectura mexicana.

7 Idem.

8 Baixas, Juan Ignacio (2010), La forma Resistente.



01



02

01 Vista interior del Palacio de Cristal, 1851.

03 Cascarones de concreto, Feliz Candela. Bacardí.

GRID SHELLS

Las Grid Shells son semejantes a los cascarones de concretos, su relación está en la geometría y en el comportamiento estructural, sólo se generan esfuerzos directos de tracción o compresión.

Son básicamente cascarones donde parte del material ha sido removido para crear una retícula, de ahí su traducción español “bóveda de celosía”⁹. Su ventaja es que a diferencia de una bóveda continua, donde hay infinidad de trayectorias de cargas posibles, en las bóvedas de celosía las fuerzas internas son llevadas por cada barra y por lo tanto las direcciones se minimizan.

Además de sus grandes ventajas por geometría y el hecho de ser autosoportante, se caracterizan por su forma de montaje. Siguiendo la definición establecida por Céline Paoli en su investigación “Pasado y Futuro de Grid Shells” se establece que **“La fuerza del concepto detrás de este tipo de estructura, radica en el proceso de construcción, siempre inicia con una estructura completamente plana y reticulada. Las superficies que no comiencen con una superficie completamente plana para después generar su curvatura al ser deformada se le considera únicamente superficie reticulada.”**¹⁰ Toda la estructura generalmente es armada en el suelo, cada cruce de la barra está articulado y permite el movimiento para que en el momento de ser montada pueda generar la doble curvatura.

Cuando la retícula se encuentra colocada en el suelo, antes de cualquier deformación, está compuesta por barras que cruzan la superficie de un extremo a otro, la superficie es básicamente es una retícula de con líneas paralelas en sentido horizontal y vertical.

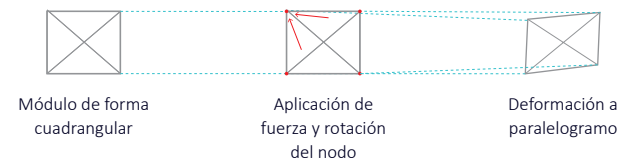
La particularidad de las Grid Shells es su forma de montaje, como se mencionó anteriormente no son construidas con la forma final. Es sólo durante del proceso de montaje donde se empuja la retícula para generar la forma deseada. Por ejemplo de la misma manera que si empujamos las esquinas de una hoja de papel para darle una curvatura, las esquinas de la retícula son básicamente empujadas unas hacia otras para lograr la forma concebida del edificio. Para que esta transformación pueda ocurrir, la superficie debe permitir la deformación.

9 Songel González, Juan María, (Mayo 2005), “Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart: Una experiencia de metodología, investigación y sistematización en la búsqueda de la forma resistente”.

10 Paoli, Céline (2007), “Past and future of Grid Shell Structures”.

Cada barra es deformada individualmente, la deformación final de cada barra actúa como un arco, si a este principio sumamos el beneficio del comportamiento de los cascarones, se puede concluir que las Grid Shells son estructuras que logran grandes claros y soportan distintas fuerzas.

Suponiendo que se tiene por módulo una forma cuadrangular, si una fuerza es aplicada a un nodo de la retícula, esto causará la rotación de los demás módulos, por lo tanto cada uno será deformado en paralelogramos, esas deformaciones causan las variaciones de longitud en la diagonal, misma que deberá llevar refuerzo.



El refuerzo diagonal en los paralelogramos ayuda a que no haya más deformaciones y a transmitir las cargas de módulo a módulo y por lo tanto asegurar la forma de la superficie.

La diagonal puede ser introducida de diferentes maneras en la Grid Shell. Por ejemplo este puede ser obtenido al limitar el ángulo de rotación entre los nodos al momento de hacer las conexiones. Otra manera es colocando un refuerzo en las diagonales. Las barras diagonales son introducidas en los módulos, actuando a tensión o compresión, previniendo el movimiento entre nodos y por lo tanto que el módulo se siga deformando, el cual puede ser de diferentes materiales.

De acuerdo a la definición de Engel las Grid Shells son sistemas de estructura de forma activa. Sistemas de estructura de materia flexible, no rígida, en el que la re- dirección de fuerzas se efectúa a través del diseño de la forma, y la característica de encontrar la forma estable.¹¹

11 -Heino, Engel (2001), Sistemas de Estructuras.

BÚSQUEDA DE LA FORMA

Este capítulo busca responder a las preguntas que surgen al hablar de la búsqueda de la forma, ¿Qué es la forma? ¿Qué significa la búsqueda de la forma? ¿Cuál ha sido la importancia de éste método?

El proceso de generación de la forma es constate en nuestro día a día, lo encontramos en distintas escalas, tanto en la naturaleza como en los objetos inventados por el ser humano. Es importante establecer que el objetivo de éste método es entender el proceso de generación de la forma por encima del resultado formal final, sin restar importancia al cálculo estructural. Entendiendo los fuerzas que actuarán sobre el modelo (analógico o digital) se puede anticipar la manera en que todo el sistema actuará y se verá modificado. Durante éste proceso se busca encontrar el punto de equilibrio en una forma que se va modificando con cargas a las que va siendo sometida, cumpliendo con las cualidades arquitectónicas que se pretenden.

Martín Bechthold afirma que el único método de diseño factible para la generación de una forma en equilibrio es a través de la búsqueda de la forma¹.

DEFINICIÓN Y CONCEPTOS

El método de la búsqueda de la forma es la elaboración de un modelo (analógico o virtual) que va siendo modificado hasta encontrar su punto de equilibrio en el sistema. En éste tipo de modelos la forma y fuerza se condicionan entre sí. La búsqueda de la forma es un método experimental dónde se busca entender la interacción entre las fuerzas y el material, nunca tratando de racionalizar las fuerzas que actuarán en la estructura.

El método de la cadena colgante es el más conocido para la búsqueda de la forma, mismo que fue base para el desarrollo de los programas para simulaciones digitales, y usado para la construcción de Grid Shells.

Las características básicas de todo modelo generado para la búsqueda de la forma son:²

Auto-forma_ El modelo genera una superficie (generalmente de una curvatura) independiente a cualquier manipulación externa.

Único_ Cada cambio en el modelo genera una configuración distinta.

Estable_ La última forma del sistema responde a el equilibrio que existe entre las cargas que actúan sobre el modelo.

1 Bechthold, Martin (2008), Innovative surface structures, technologies and applications.

2 IL 10 Grid Shells (1974), Stuttgart: Institute of Lightweight Structures, University of Stuttgart.

- FORMA ARBITRARIA⁻¹

Forma: resultado de la voluntad o capricho

Fuerza: orientada

Materia: pasiva, inerte

1 Moneo Vallés, José Rafael (2005), "Sobre el Concepto de Arbitrariedad en Arquitectura", Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. Discurso del académico electo Excmo. Sr. D. José RAfael Moneo Vallés, leído en el acto de su recepción pública el día 16 de Enero de 2005.

- BÚSQUEDA DE LA FORMA ⁻¹

Forma: resultado de las interacciones de un sistema

Fuerza: optimizada

Materia: activa, inteligente

1 Akos, Gil (2012), Form, Force, Matter, Pratt Institute, Undergraduate + Graduate Architecture Program

MODELOS ANALÓGICOS

Un modelo es la representación simplificada de la realidad en la que se representan algunas de las propiedades de una circunstancia real.¹

La ventaja de usar modelos analógicos es la rapidez con la que se puede trabajar y cambiar una configuración, entendiendo los procesos de generación y funcionamiento de una estructura. Los resultados de los modelos analógicos son aproximaciones a la realidad, los cuales deberán ser calculados posteriormente para la verificación de su estabilidad.

Los modelos se construyen para conocer o predecir la forma en que actuará el modelo real de una manera sencilla, tangible y fácil de comprender, teniendo en cuenta que los modelos deben tener características similares a las que tendrá en la realidad. Debido a que el modelo no es exacto, se tiene menos información que en la realidad, existe un error relacionado al método, el cual puede reducirse pero no eliminarse, Juan Ignacio Baixas en su libro La forma resistente, lo define como el principio de la no similitud, esto es que nada nos garantiza que un modelo a escala reducida mantenga su resistencia llevado a la escala real. La resistencia de estructural de los elementos estará dada por su sección.²

Frei Otto y otros arquitectos e ingenieros han desarrollado múltiples técnicas que han permitido diseñar y probar de manera rápida formas complejas. **Todos los modelos tienen en común que las formas son resultado de condiciones específicas de la relación entre materia y fuerza.** La selección de que modelo análogo usar depende del tipo de estructura que se quiera construir.

Los modelos que manejó Frei Otto para la búsqueda de la forma son³:

Experimentos con membranas de jabón_ Marcos cerrados hechos de cable o hilo, que son sumergidos en una sustancia jabonosa y al sacarlo produce la superficie mínima. Utilizado para las posibilidades de forma de estructuras tensadas, o de cables.

Equipos para la generación de estructuras neumáticas_ Aparatos donde una hoja delgada de acrílico o PVC es inflada con aire comprimido para la búsqueda de las posibilidades de forma.

Experimentos con bandas de yeso_ Estos modelos usan las bandas de yeso, usadas generalmente en cuestiones médicas, sumergiéndolas en agua, colocadas de manera suspendida hasta secar y al voltearse son ejemplos de bóvedas rígidas.

1 Felicísimo, Ángel, Conceptos básicos, modelos y simulación.

2 Baixas, Juan Ignacio (2010), La forma Resistente.

3 Menges, Axel (2006), Frei Otto, Bodo Rasch: Finding form.

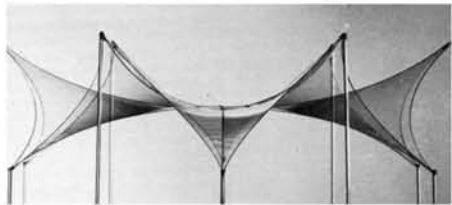
Experimentos de arena_ Para la generación de formas de embudo y conos y examinar los edificios de tierra y la construcción de asentamientos irregulares.

Experimentos mesas de inclinación y rotación_ La estabilidad de los edificios es investigada al poner un modelo a escala y someterlo a movimientos e inclinaciones.

Experimentos con hilos de lana_ Para la investigación de sistemas optimizados de caminos y construcciones a través de ramificaciones.

Por último, y no menos importante, son los modelos de cadena colgante, usados para la búsqueda de la forma de Grid Shells, y en los que se profundizará en ésta tesis.

Modelos de cadena colgante_ Modelos hechos de cadenas, dónde éstas son suspendidas, tomando la forma de su propio peso, cuya idealización es invertirla y tener las posibilidades de estructuras. Los modelos de cadenas colgantes son arcos y bóvedas que pueden ser construidos como el modelo a escala.



3a



3b



6a



6b



4a



4b



7a



7b



5a



5b



8a



8b

3a Experimentos con membranas de jabón.

4a Acrílico inflado para la búsqueda de estructuras neumáticas.

5a-b Experimentos con bandas de yeso.

3b 'Tanzbrunnen' Tent in Cologne by Bodo Rasch.

4b P_WALL (2013), Andrew Kudless.

6a Formación de células de la arena que pasan por los agujeros

7a-b Acrílico inflado para la búsqueda de estructuras

8a Experimentos de optimización de caminos.

6b Fabricación de prototipo con base en los experimentos de arena.

7b Aeropuerto de Barajas, Madrid. Richard Rogers.

MODELOS DE CADENA COLGANTE EN GRID SHELLS

Todos los modelos colgantes consisten en un sistema articulado de barras similares en tamaño y peso, conectadas entre sí; están basados en los principios de equilibrio donde el peso propio y las fuerzas a las que está sometido están distribuidas uniformemente (peso por unidad de longitud) viéndose reflejado en la forma resultante. En estos casos el modelo sólo presenta esfuerzos de tracción. La forma invertida es la idealización de la estructura de manera rígida.

Es bien sabido que si colgamos una cadena desde sus extremos (sin cargas adicionales que actúen sobre ella) se genera una curva a la que llamamos catenaria. El término catenaria fue utilizado por primera vez por el matemático Huygens en 1960¹. La catenaria es la curva generada por el equilibrio de un cable sometido a su propio peso, presentando sólo esfuerzos de tracción.

Dependiendo de cómo esté sostenida la cadena se generan distintas curvas que van cambiando la escala de altura y ancho de la curva. La variedad de formas que pueden ser generadas en este proceso de la búsqueda de la forma es muy amplio. El proceso que le toma al modelo adaptarse a cualquier esfuerzo externo que hace que cambie de forma se le denomina “equilibrio pendular²”, ya que antes de alcanzar la forma final entra en un período de oscilación hasta que absorba las fuerzas a las que fue sometido.

Existen distintas maneras de clasificar las retículas de los modelos colgantes³, para efectos de ésta tesis sólo serán descritos dos de ellos. El primero se refiere al tipo de retícula que se usa en el modelo colgante, y el segundo se refiere a la capacidad de deformación de la retícula.

Mallas en general:

1_ Retículas no uniformes

1.1_ Forma libre (excepto triángulos)*

1.2_ Formas irregulares

1 Heyman, Jacques (2004), Análisis de estructuras: un estudio histórico.

2 Baixas, Juan Ignacio (2010), La forma Resistente.

3 IL 10 Grid Shells (1974), Stuttgart: Institute of Lightweight Structures, University of Stuttgart.

* Una de las condiciones en la construcción de Grid Shells es la deformación de la retícula para generar las superficies de curvatura, debido a que el triángulo es prácticamente una figura indeformable (para deformarse se tiene que extender alguno de sus lados) no se considera, específicamente para la construcción de Grid Shells, como una retícula posible.

2_ Retícula uniforme

2.1_ Un sólo patrón

2.2_ Varios patrones

Formas de la malla (tipo de deformación):

1_ Cinemática⁴

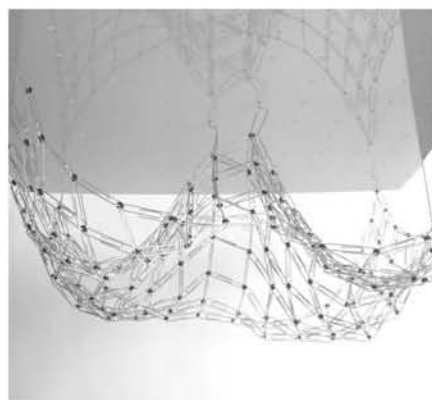
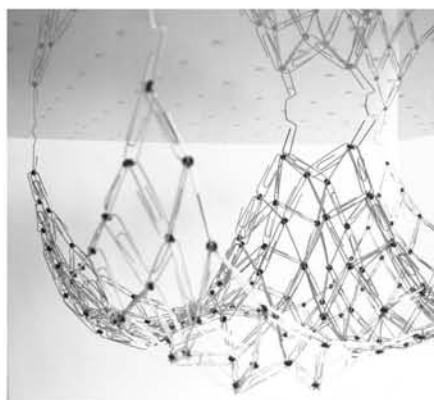
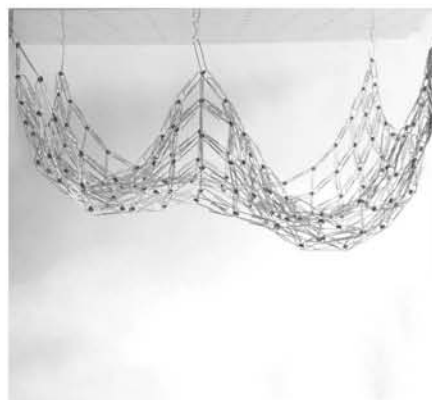
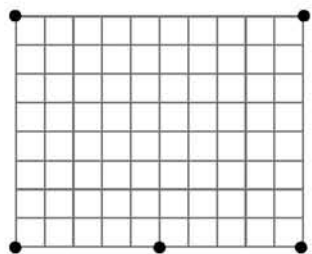
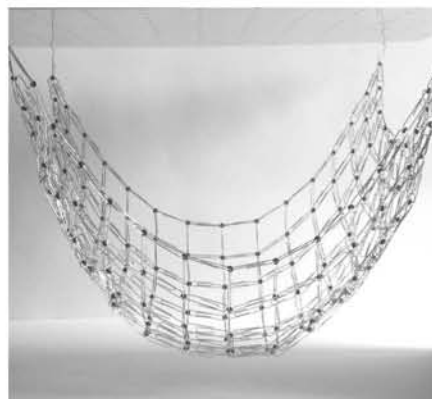
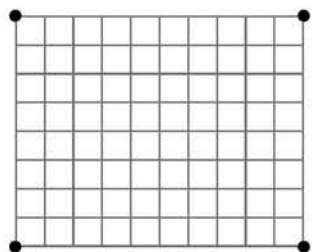
Al cambiar los ángulos de las figuras con a que está construida la malla, la distancia entre los nodos siempre es la misma.

2_ No Cinemática

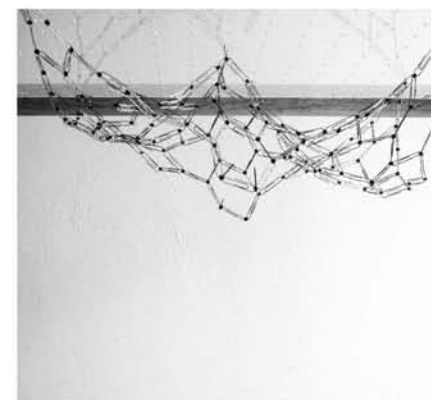
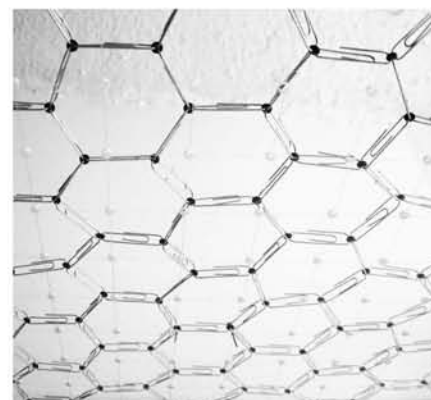
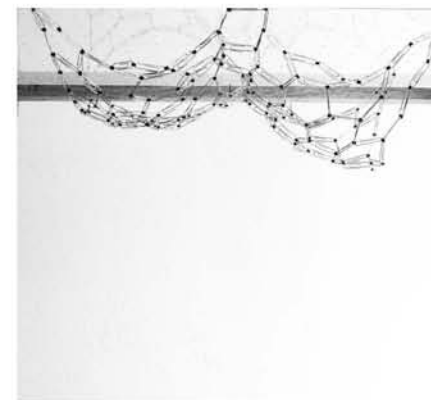
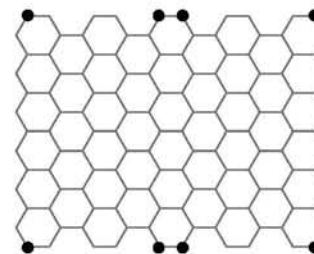
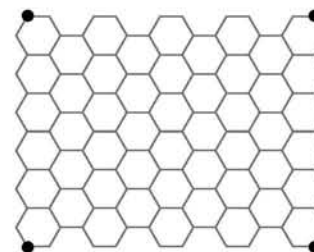
El triángulo es la única figura considerada no cinemática, ya que cuando los nodos de la malla son deformados la distancia entre éstos aumenta.

4 Se enfoca en el movimiento prescindiendo de las fuerzas que lo producen.

MALLA DE RETÍCULA UNIFORME CUADRANGULAR



MALLA DE RETÍCULA UNIFORME HEXAGONAL



MODELOS DIGITALES

El desarrollo del diseño computacional comienza a principios de 1960¹ y posteriormente el inicio de simulaciones digitales, las cuáles se utilizaban principalmente en el área de la automotriz, aeronáutica y marítima. El crecimiento que han tenido los procesos digitales en arquitectura han contribuido a re definir los procesos de la búsqueda de la forma y la realización de proyectos que antes parecerían poco realizables.

Frei Otto junto con el Instituto de Estructuras Ligeras creaban modelos físicos sumamente precisos para determinar la forma, que posteriormente fueron remplazados por algoritmos basados en geometría y leyes de física. El uso de algoritmos no significó el abandono de la construcción de modelos físicos.²

Es innegable la importancia que tiene la tecnología en nuestros días, existen nuevos métodos, múltiples posibilidades y la capacidad de manejar distintos tipos de información simultáneamente dentro de una simulación. Una de las principales ventajas del diseño computacional es la utilización de procesos computacionales en la búsqueda de la forma.

Para el desarrollo de simulaciones digitales de ésta tesis se toma la definición de Gil Akos, donde define este proceso como la manera de informar a un sistema virtual de propiedades físicas (materia), el cuál está puesto bajo presión (fuerzas) para lograr una estructura específica (forma). Esto es informar a un sistema virtual que durante el procesamiento de la información genera una estructura.³

Es importante recordar en todo momento, que no se trata de la forma final, sino cómo se llega a ella. Las simulaciones digitales toman como base todos los principios de los modelos análogos, el objetivo no es el uso de tal o cual programa que procese la información, es entender que información necesitamos introducir (input) para lo que es necesario, sobretodo para el proceso de la búsqueda de la forma de manera digital, tener conocimientos de física, entre otros, para saber cómo será el procesamiento de la información y poder anticipar que resultados se están generando (output). El objetivo entonces será usar las herramientas digitales como proceso de diseño.

1 Spuybrook, Lars (2005), The structure of Vagueness. Performative architecture: beyond instrumentality.

2 Oliva Salinas, Juan Gerardo. Valdez Olmedo, Eric (2012) Contribuciones de la Arquitectura Textil Durante el Siglo XX.

3 Akos, Gil (2012), Form, Force, Matter, Pratt Institute, Undergraduate + Graduate Architecture Program

SIMULACIÓN DIGITAL EN GRID SHELLS

De la misma manera que hay diferentes modelos análogos, hay distintos programas para generar las simulaciones digitales, para simulaciones de cadena colgante se usó Smart Form⁴ y para la simulación final Kangaroo⁵.

De acuerdo a los programas seleccionados hay dos maneras de generar simulaciones de Grid Shells, la primera es con modelos colgantes y la segunda, más acercada a la realidad, por medio de aplicación de fuerzas, valores de elasticidad y plasticidad.

Los resultados son muy similares, la diferencia radica en la información necesaria para generar la simulación.

Para entender cómo la geometría de la malla afecta la forma final, se generaron distintos patrones de malla y se compararon entre sí, cuyo cambio más significativo es la altura.

4 www.smart-solutions-network.com [Fecha de consulta: 10 abril 2015]

5 kangaroo3d.com [Fecha de consulta: 10 abril 2015]

SIMULACIONES DIGITALES DE RETÍCULA UNIFORME

RHINO + SMARTFORM

PLANTA

DEFORMACIÓN EN
PLANTA

MODELO CADENA
COLGANTE

FORMA INVERTIDA

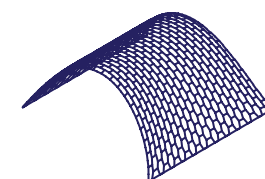
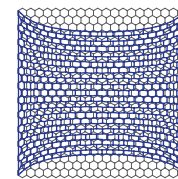
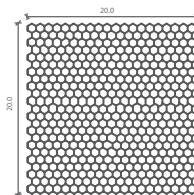
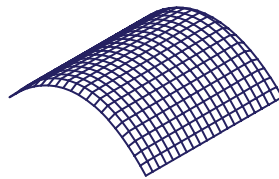
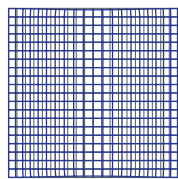
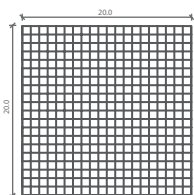
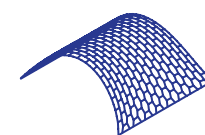
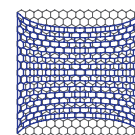
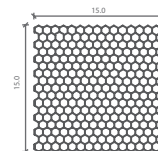
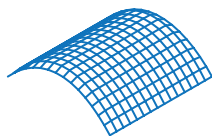
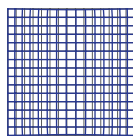
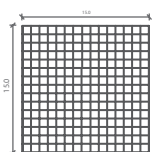
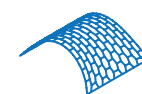
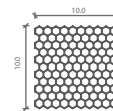
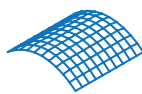
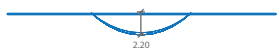
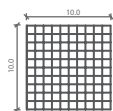


PLANTA

DEFORMACIÓN EN
PLANTA

MODELO CADENA
COLGANTE

FORMA INVERTIDA



CONCLUSIÓN

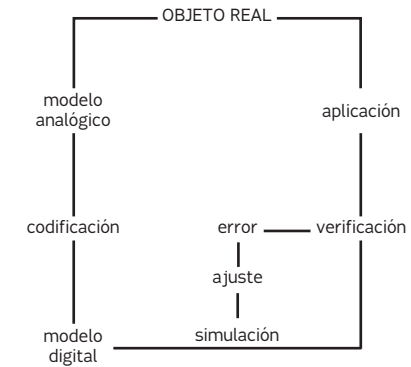
La búsqueda de la forma estaba limitada a la creación de modelos analógicos hechos a escala con mucha precisión, dependiendo de la precisión del modelo se generaban resultados que podían ser útiles o no para el diseño de la estructura. Los modelos analógicos sirven como punto de partida para el desarrollo de las simulaciones digitales de la búsqueda de la forma.

Las simulaciones en ambos casos (análogos o digitales) sirven para evaluar de una manera muy básica las cualidades estéticas, espaciales, viabilidad técnica del objeto arquitectónico. La intención es el entendimiento del comportamiento de la estructura con conceptos básicos para que después sean evaluados por especialistas y verifiquen su estabilidad y posibilidades de ser construido.

La elaboración de un modelo analógico no debe eliminar la posibilidad de una simulación digital, y viceversa. Deben de entenderse como complementos, no de manera independiente. La ventaja que tienen las simulaciones digitales sobre los modelos analógicos es la manera que la información es procesada, permitiendo una representación visual manejable por medios informáticos, además los resultados pueden utilizarse en distintos programas para obtener diferentes resultados (manipulación de datos).

Ambos métodos son usados en el desarrollo conceptual de Grid Shells para evaluar el diseño, las cargas a las que estará sometida, y las posibles dificultades que representará su construcción.

SISTEMA DE RELACIÓN ENTRE MODELO ANALÓGICO Y SIMULACIÓN DIGITAL¹



1

Felicísimo, Angel Manuel, Conceptos básicos, modelos y simulación.

RELACIÓN CON EL MATERIAL

“Each material not only have characteristics, but also have meaning. Each material has its’ own message, speaks an own language” Frank Lloyd Wright.¹

Al inicio de éste capítulo se estableció que el origen y desarrollo de nuevas formas arquitectónicas y estructurales está intrínsecamente ligadas a la creación de nuevos materiales, para que esto suceda hay dos fases por las que pasa todo material. La fase de experimentación y posteriormente su aceptación.²

La primera fase consiste en el entendimiento de las propiedades del nuevo material. En esta etapa inicial en las primeras ocasiones al utilizar el material, se imitan técnicas de construcción de los materiales ya conocidos. Un ejemplo es el puente de Coalbrook³, el puente se hizo famoso durante la revolución industrial al convertirse en el primer puente fabricado en acero, sin embargo el sistema constructivo utilizado es el mismo para los puentes construidos en piedra y las uniones hacen referencia a los ensambles hechos en madera. La experimentación del material consiste en el proceso que llevará a conocer y controlar las características y propiedades del nuevo material, para después generar una innovación en la técnica de construcción.

La segunda fase consiste en la aceptación del material, teniendo como base la experimentación. El material empieza a ser conocido y utilizado por arquitectos y diseñadores demostrando las posibilidades formales que puede lograr.

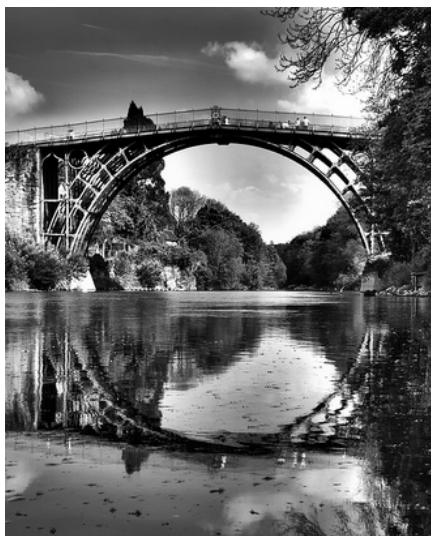
¿Qué hubiera sido de la arquitectura moderna, en especial de lo cinco puntos de Le Corbusier, sin el desarrollo de las múltiples posibilidades del concreto armado?

Al finalizar las dos etapas es cuando surgen las innovaciones en la técnica de construcción, tomando en cuenta las propiedades y características del material, potencializando sus valores expresivos. Considerar los valores y propiedades de los materiales hacen que los materiales tengan un peso importante en el proceso de diseño. Al momento de elegir un material no deberíamos de pensar en concreto, acero o vidrio; debemos pensar en las propiedades de los materiales, pensar en ligereza, pesadez, transparencia; éstas propiedades son mucho más importantes que la especificación de una piedra seleccionada.

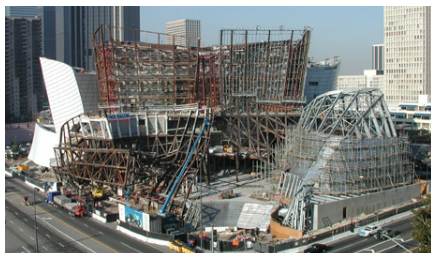
1 Edited by Bruce Brooks Pfeiffer (2008). *The Essential Frank Lloyd Wright : Critical Writings on Architecture*. Princeton University Press.

2 Bernabeu, Alejandro (2007), *Estrategias de diseño estructural en la arquitectura contemporánea*.

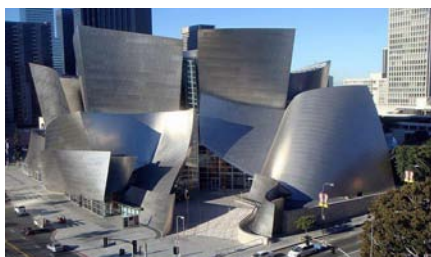
3 Ídem



09



10



11

09 Puente Coal Brookdale.

10 Estructura de acero para generar la forma del Walt Disney Concert Hall de L.A.

11 Walt Disney Concert Hall de L.A. Frank Gehry

Neil Denari⁴ describe tres características básicas existentes en todo material:

- 1 Características físicas.
- 2 Trabajabilidad (capacidad de doblarse, cortarse, etc.).
- 3 La percepción a través del tacto.

Hasta ahora se ha hecho énfasis en el impacto que ha tenido la creación de nuevos materiales, sin embargo es el cambio en el pensamiento que ha generado los avances tecnológicos. Con el entendimiento de las características y propiedades de los materiales el ámbito de la construcción ha vuelto a considerar algunos de los materiales más “antiguos”, como la madera y la tierra compactada.

Frei Otto demostró que la composición interna del material y la estructura están siempre relacionadas, de tal manera que en su arquitectura no existe distinción entre la forma, la materia y la estructura.⁵

Otro aspecto que ha impulsado el desarrollo de nuevos materiales, o el regreso de algunos de ellos, es el impacto ecológico que tiene la industria de la construcción. En la actualidad la elección del material debiera tomar en cuenta aspectos como el uso de energía (para su producción, traslado, montaje...), el potencial de reciclaje y la sostenibilidad como recurso.

En muchos casos en arquitectura, la práctica está basada en la realización de un diseño caracterizado por priorizar la forma por encima del material. Innumerables ejemplos como la arquitectura de Frank Gehry, Coop Himmelblau, entre otros.

Se pueden distinguir dos procesos de fabricación:

- 1 donde cualquier forma es posible de ser construida, racionalizando las fuerzas que actuarán sobre ella.
- 2 donde no es posible omitir las características y propiedades del material al momento de construir.

En el ámbito laboral, a pesar de los múltiples beneficios, es muy difícil encontrar despachos dispuestos a arriesgar e invertir en la investigación e innovación de técnicas y posibilidades de los materiales, generalmente por aspectos económicos.

4 Denari, Neil (2012) Entrevista por Peter Bordon, Gail, encontrada en el libro “Matter, Material processes in architectural production.

5 Pasquale de Paola, Form Follows Structure: biomimetic emergent models of an architectural production.

Sin embargo es en las Universidades donde se han desarrollado programas a nivel Licenciatura y Maestría, para impulsar investigaciones enfocadas en el proceso de diseño del objeto arquitectónico trabajando con las propiedades del material y generación de la forma. El trabajo desarrollado por Achim Menges⁶, usando como herramienta el diseño computacional, es un ejemplo del proceso de materialización de búsqueda de la forma tomando en cuenta las propiedades los materiales y nuevas tecnologías.

Todas las obras en arquitectura implican (consciente o no) una interacción entre el diseño y la materia. El material más usado para la construcción de Grid Shells es la madera, por sus propiedades y características, teniendo como beneficio implícito el favorable impacto ambiental. Es por eso que se ahondará en la madera como material de construcción, aclarando que también existen ejemplos construidos de Grid Shells en fibra de vidrio, tubos de cartón o materiales compuestos.

LA MADERA

La principal ventaja de construir en madera, en la actualidad, es el favorable impacto ambiental que tiene respecto a otros materiales. El árbol a través de la fotosíntesis capta (“respira”) CO₂, exhalando oxígeno y almacenando el dióxido de carbono en la estructura de la propia madera. Según el Centro Nacional de Desarrollo de la Madera de Francia (CNDM) una tonelada de madera empleada en la edificación significa 1,6 toneladas de CO₂ retiradas de la atmósfera.

Para el desarrollo del tema de las propiedades y características de la madera se tomaron como fuentes principales la Confederación Española de Empresas de la Madera Española⁷ y el Centro Nacional de Desarrollo de la Madera de Francia

En el texto publicado por Agustín Hernández Hernández define la madera como “Un material homogéneo, de conducta elastoplástica, ya que antes de fallar presenta una etapa lineal elástica y después plástica, por lo tanto resulta apta para emplearse estructuralmente”.⁸

6 Achim Menges es un arquitecto y profesor. La investigación de Menges se enfoca en el desarrollo del proceso de diseño. Menges analiza sistemas relacionados con la biomimética, diseño computacional, desarrollo de sistemas computacionales y la fabricación asistida por computadora. Su trabajo está basado en el acercamiento multidisciplinario de ingenieros estructurales, especialistas en computación y en materiales, así como biólogos.

7 Confederación española de empresas de la madera. www.confemadera.es/la-madera

[Fecha de consulta: 18 mayo 2015]

8 Hernández Hernández, Agustín (2012). La Madera en la Arquitectura del Siglo XX.

LA MADERA COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

La ventajas consideradas para efectos de ésta tesis son:

- a Requiere poco gasto energético para su fabricación, transporte y puesta en obra.
- b Es ligera y con una buena relación resistencia/peso.
- c Con el diseño y ejecución adecuados las soluciones constructivas con madera son muy durables.
- d Es fácilmente manejable.

A continuación se desarrollará cada uno de estos puntos.

Bajo consumo energético.

En su proceso de “fabricación” el árbol utiliza la energía solar para la obtención del material. El uso de energía en los procesos de transformación del material es mucho más bajo que otros materiales, por ejemplo para la obtención de 1m² de material se utiliza diecisiete veces menos energía que en las estructuras de acero. Por otra parte, después del periodo de vida útil de la madera (ciclo de vida), al ser un material biodegradable no es contaminante.

Ventajas de resistencia.

La madera es un material ligero en relación entre resistencia y peso. Esta relación resulta favorable para los esfuerzos de tracción y compresión, siempre que las fuerzas se apliquen de manera paralela a las fibras, siendo similar estructuralmente a la capacidad de tracción y compresión del acero, y superior en el caso del concreto en esfuerzos de tracción.

Durabilidad.

Diferentes obras en arquitectura construidas en madera hace cientos de años, en buen estado en la actualidad, son prueba de la durabilidad y capacidad del material.

Ventajas constructivas.

Adaptabilidad. Las múltiples técnicas de construcción en madera generan un amplio campo de posibilidades arquitectónicas.

Tiempo de montaje. Por su ligereza y fácil ajuste en obra, las estructuras de madera permiten reducir los tiempos de montaje con respecto a otros materiales.

NOCIONES BÁSICAS DEL MATERIAL

Anisotropía.⁹

La anisotropía es fundamental en el ámbito arquitectónico ya que determina la forma de colocar o disponer un determinado elemento constructivo. Las propiedades de los materiales varían según una determinada dirección, siendo en ciertas ocasiones esenciales para definir la orientación, proporción, forma, o sistema constructivo.

En la madera, a causa de su estructura vegetal, de sus conductos verticales por donde circula la savia, entre otras características, presenta una resistencia a tracción muy diferente si se aplica el esfuerzo en el sentido de sus fibras que si se aplica perpendicularmente.

La dirección de la estructura interna de la madera puede influir también en propiedades como la reflexión, absorciones lumínicas, acústicas, capilaridad, entre otras.

Higroscopicidad.

La madera es un material higroscópico esto es tiende a absorber o ceder agua según el ambiente al que está sometida (humedad relativa y temperatura ambiente). Para una humedad y una temperatura determinada, la madera se estabiliza a un valor de porcentaje de humedad que recibe el nombre de humedad de equilibrio higroscópico. La resistencia y rigidez de la madera son inversamente proporcionales al porcentaje de agua que posea.

Esta característica es en particular muy importante para la construcción de Grid Shells, al ser estructuras que necesitan de la deformación para tomar “forma” la higroscopicidad permite que el material pueda deformarse como se desea con la ayuda de agua y una vez seca será una forma en equilibrio. Hay que considerar que una vez que se deforma la madera, ésta no podrá volver a su estado original.

Elasticidad¹⁰

La elasticidad, estudiada por la mecánica de sólidos deformables, es la propiedad mecánica de ciertos materiales de sufrir deformaciones reversibles cuando se encuentran sujetos a la acción de fuerzas exteriores y de recuperar la forma original si estas fuerzas exteriores se eliminan.

9 Sastre Sastre Ramón, Muños Salinas Francisco, “Propiedades de los materiales y elementos de construcción”, Noviembre 2010.

10 www.wikipedia.com [Fecha de consulta: 18 mayo 2015]

Existe un límite donde el material puede regresar a su forma original denominado límite elástico.

Plasticidad¹¹

La plasticidad es la propiedad mecánica de un material de deformarse permanente e irreversiblemente cuando se encuentra sometido a tensiones por encima de su rango elástico, es decir, por encima de su límite elástico.

CONCLUSIÓN

Forma y material siempre han caracterizado al diseño. La forma como primer acercamiento hacia al objeto, el cuál es visual, y la materia necesita un proceso de entendimiento que define el material y la forma de construirse.

La importancia de tomar en cuenta las propiedades de cualquier material al momento de construir radica en la optimización de recursos y generación de formas de acuerdo a las posibilidades que tiene cada material.

Debemos de pensar forma, materia y estructura como uno sólo y no como elementos aislados, el beneficio de cambiar el proceso de pensamiento se refleja en las múltiples posibilidades de diseño.

Un nuevo material no es sinónimo de un sistema constructivo innovador, el uso de un sólo material tampoco tiene los mejores resultados, debemos pensar en las propiedades de los materiales, pensar en ligereza, pesadez, transparencia; éstas características son mucho más importantes que la especificación de cualquier material seleccionado.

La madera en los últimos años ha vuelto a ser utilizado en el ámbito de la construcción, además de la belleza misma del material y sus propiedades, es el único material que al final del transporte y construcción su relación de emisiones de CO2 es un número positivo.

11 www.wikipedia.com [Fecha de consulta: 22 mayo 2015]

CAPÍTULO

03

CARACTERÍSTICAS E INNOVACIONES

CONCEPTOS BÁSICOS

La finalidad de este capítulo es enlistar las características de las que se compone una Grid Shell, ver cada elemento aisladamente para entender la importancia, y la relación con cada una de las partes. Los ejemplos usados para la descripción de las características están tomados de Grid Shells construidas y casos de estudio del libro IL 10 Grid Shells¹, publicado por el Instituto de estructuras ligeras de Stuttgart, dónde Frei Otto es el principal promotor de éste tipo de estructuras.

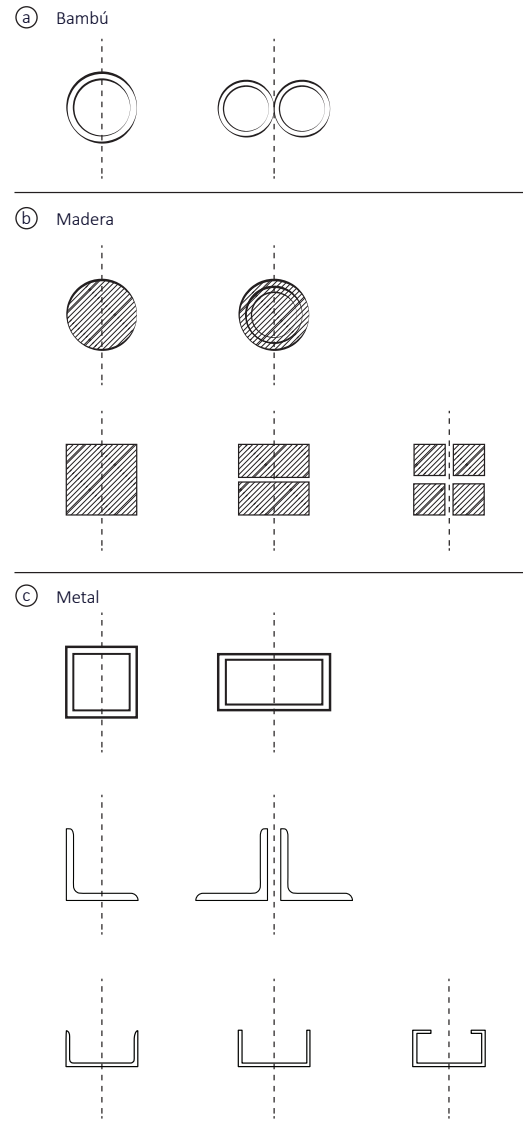
El proyecto de mayor relevancia y de donde surgen la mayoría de los esquemas presentados es de la construcción del Multihalle Pavillion.

Las características serán presentadas de la siguiente manera:

- a Retícula y Barras
- b Unión entre barras
- c Nudo
- d Diagonales
- e Fijación al piso
- f Cubierta
- g Estrategias de Montaje

1 IL 10 Grid Shells (1974), Stuttgart: Institute of Lightweight Structures, University of Stuttgart.

Secciones tipo de acuerdo al material



RETÍCULA Y BARRAS

En los ejemplos hasta ahora contruidos se han desarrollado dos métodos para construir Grid Shells. La primera, y menos usada, es a través de líneas geodésicas. La segunda es una retícula de barras intersectadas entre sí con una sola geometría, generalmente cuadrado.

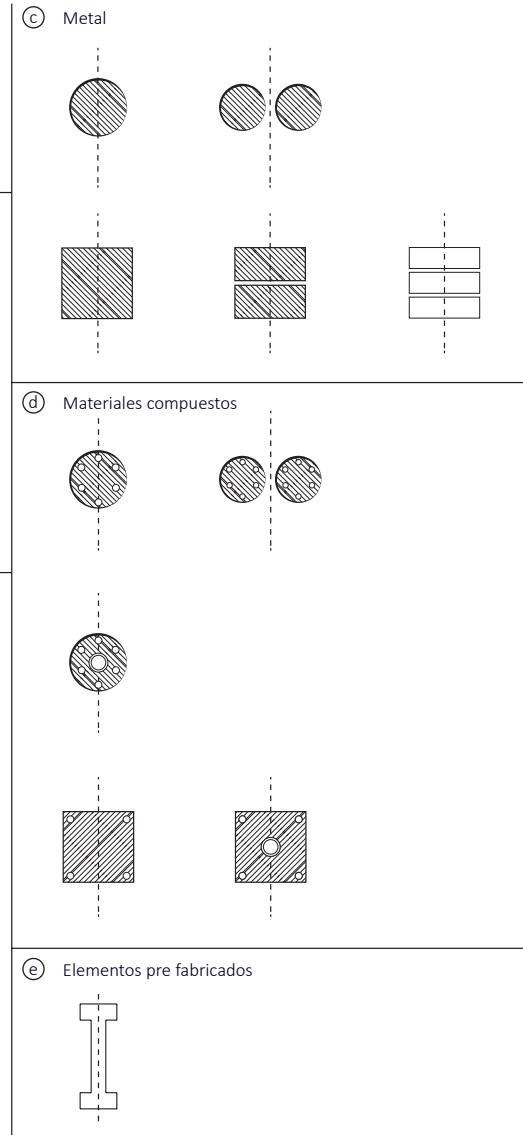
La línea geodésica se define como la línea de mínima longitud que une dos puntos sobre una superficie en específico. Las Grid Shells desarrolladas con líneas geodésicas parten de barras rectas y rígidas que son deformadas para generar una superficie, cumpliendo de ésta manera con las características para que pueda considerarse Grid Shell.

En el segundo caso, las barras que conforman la retícula de una Grid Shell son elementos rígidos sin deformación. La retícula está compuesta por una serie de barras que se intersectan unas a otras para generar una trama. La longitud de cada barra depende del material seleccionado así como de la geometría de la retícula. En los casos de estudio contruidos la sección de la barra siempre es la misma en todas las barras. Ésta sección transversal será la que sufra la deformación, y será la que distribuya las fuerzas a las que será sometida la estructura.

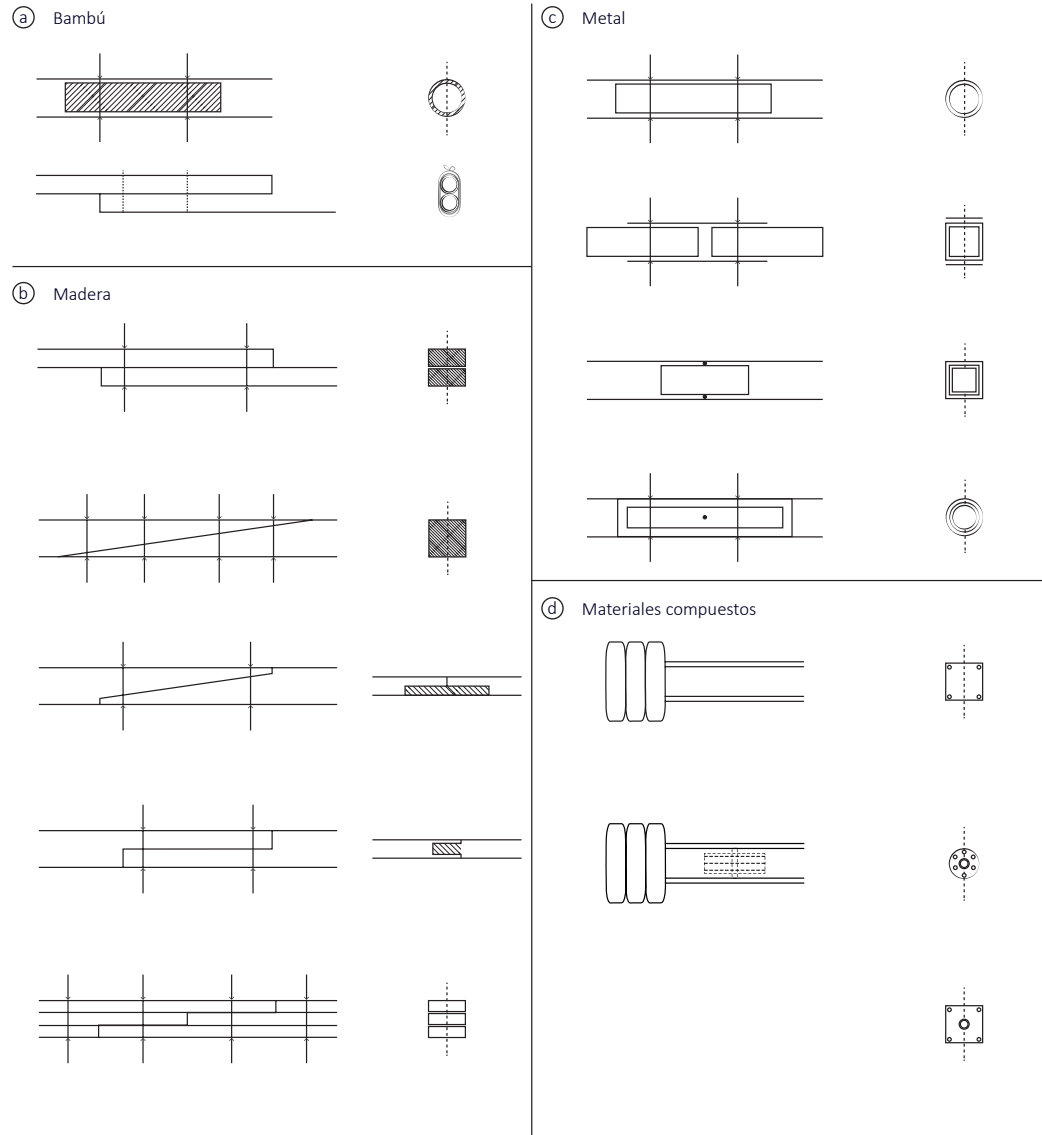
Grid Shells de pequeña escala generalmente son contruidas con una sola retícula, las de gran escala es preferente que se contruyan de doble capa para agregar estabilidad.

De acuerdo a los ejemplos contruidos, los materiales que pueden utilizarse para la construcción de Grid Shells son:

- a Bambú. Preferentemente para la construcción de Grid Shells de escala pequeña. Grid Shells de una sola retícula.
- b Madera. El material más usado para la construcción de este tipo de estructuras. Las características que debe cumplir la madera son: de fibra larga y con el menor número de deformaciones.
- c Metal. Generalmente acero o aluminio. La rigidez del material disminuye la libertad de forma.
- d Plásticos o Materiales Compuestos. Usados por la relación de la resistencia que aporta a la estructura.
- e Elementos pre fabricados. Hasta ahora no hay ejemplos contruidos con este método sin embargo se desarrolla para Grid Shells con una forma específica.



Ejemplos de unión entre barras para lograr la longitud deseada de acuerdo al material



UNIONES ENTRE BARRAS

La longitud de las barras depende de la retícula y de la capacidad de transportación de las mismas. No existen materiales en su naturaleza de dónde se puedan obtener barras los suficientemente extensas, es por eso que se desarrollan detalles constructivos para unir dos barras, formando de ésta manera una barra continua de la retícula.

Es fundamental la continuidad de las barras ya que los esfuerzos a los que esté sometida la estructura tendrán que ser transmitidos al suelo a través de las mismas. Si fuera una superficie continua tendría múltiples posibilidades de direcciones para transmitir los esfuerzos al suelo.

Existe la posibilidad que las uniones entre barras sean realizadas de fábrica, especialmente en materiales como plásticos o materiales compuestos, las cuales pueden ser producidas bajo condiciones de optimización que respondan a las necesidades del proyecto.

Generalmente las uniones de madera son hechas en sitio por la restricción de su transportación.

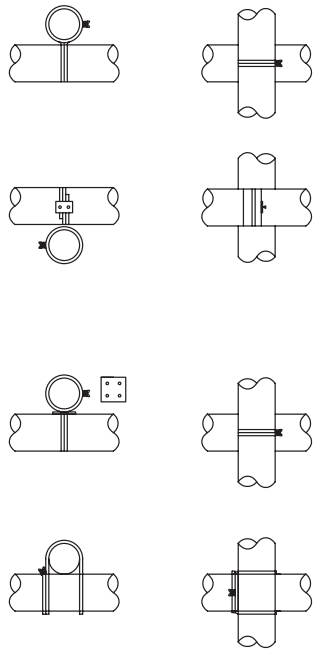
Se puede anticipar que las partes dónde haya uniones serán menos firmes que el resto de la barra. Sin embargo estructuralmente estos nodos deben ser capaces de soportar con adecuada estabilidad y rigidez, la totalidad de las cargas y otras esfuerzos a los que pueden ser sometidos durante su montaje, construcción y uso.

Las uniones dependen del tipo de material:

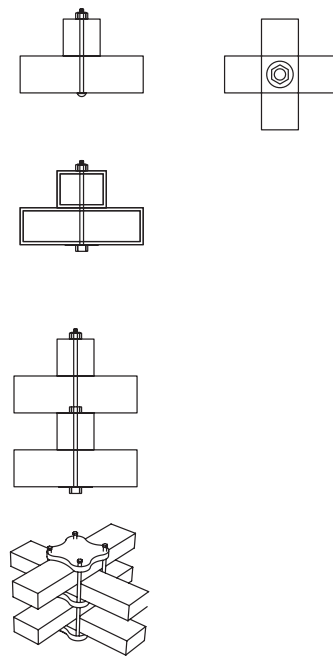
- a Bambú Se conectan a través de un tubo interior conectando ambas barras. Pueden ir atornilladas o pegadas a la conexión.
- b Madera. Pueden ser uniones mecánicas (clavos, pernos, conectores), uniones de contacto (machihembrado, cola pato, entre otras) o uniones con pegamentos.
- c Metal. Generalmente con soldadura.
- d Plásticos o Materiales Compuestos. Generalmente las uniones son realizadas en fábrica, o si son hechas en sitio son atornilladas.

Ejemplos de nodos

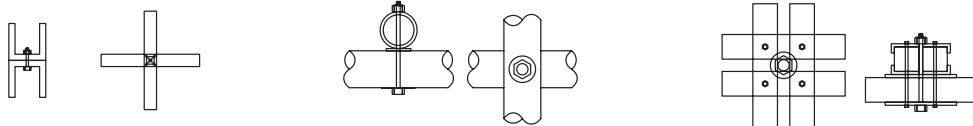
a) Bambú



b) Madera



c) Metal y Plásticos



NODO

El nodo es el punto de intersección entre dos barras continuas, mediante el cual las barras están unidas unas a otras.

En la etapa de montaje de una Grid Shell, el nodo debe permitir el cambio de ángulo de la retícula para poder generar la superficie.

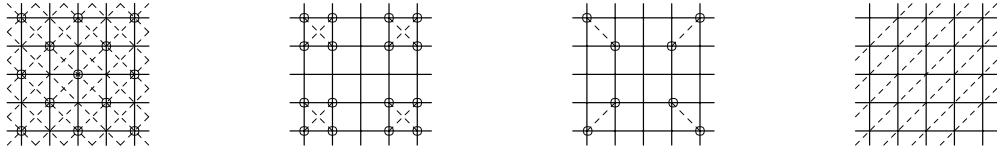
Al final de la construcción, los nodos serán fijados para impedir cualquier cambio en la forma establecida. En el proceso de montaje así como al término de éste los nodos deben soportar esfuerzos de flexión y tracción sin deformarse.

El tipo de nodo que debe seleccionarse dependen de dos factores, del material y principalmente de la escala de la estructura.

Los posibles tipos de nodos son:

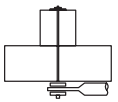
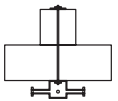
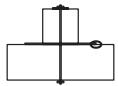
- a Nodos hechos con cables de acero. Generalmente para barras de sección circular.
- b Nodos con pernos, tuercas y rondanas. Generalmente para barras de madera, es importante mencionar que el tramo que es perforado se vuelve más débil que el resto de la barra.
- c Nodos con placas metálicas y pernos, la ventaja de éste tipo de nodo es que al momento de colocarlo entre dos barras actuará a compresión, sin tener que perforar las barras de la retícula.

Posibilidades de colocar las diagonales en Grid Shells

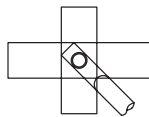
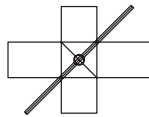
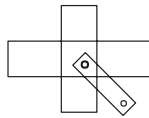


Detalles de barras para colocar diagonales

(a) Preparación del nodo



(b) Colocación de la diagonal



(c) Ejemplos de diagonales



DIAGONALES

Uno de los objetivos de realizar modelos analógicos o simulaciones digitales es para saber como se deformará la estructura y por lo tanto poder calcular cada ángulo de la retícula. La forma final de la Grid Shell es establecida cuando los ángulos de la retícula coinciden con los datos obtenidos por el modelo o simulación. La exactitud de la información obtenida dependerá de la precisión con la que fueron realizados los modelos.

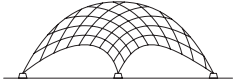
Una vez que la estructura tiene la forma deseada la rigidez se logra con la colocación de una barra diagonal, que subdivide la geometría de la retícula en triángulos para hacerla más estable. La manera más simple de rigidizar la estructura es pasar sobre los nodos las diagonales, éstas generalmente son de cables de acero, aunque pudiera ser también otra barra de madera.

Para una correcta elección del material, éste debe cumplir las siguientes características:

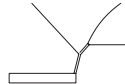
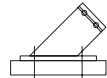
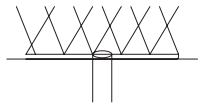
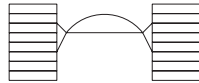
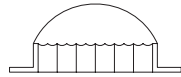
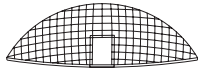
- 1 La longitud debe poder ser ajustable.
- 2 Si la diagonal es colocada durante el montaje no debe interferir en el proceso de generación de la forma.
- 3 Las diagonales pueden colocarse de manera temporal, como apoyo en el proceso de montaje y posteriormente ser retiradas, sin embargo para proyectos de gran escala es recomendable dejarlas como parte de la estructura.
- 4 Una manera de asegurar las diagonales a las barras es adicionalmente a la sujeción del nodo en secciones pueden ir clavadas, o pegadas o soldadas para impedir cualquier cambio en la forma final.

Tipos de retícula

① Retícula completa en bordes

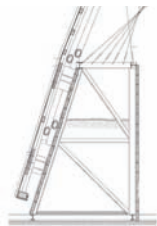


② Retícula incompleta en bordes

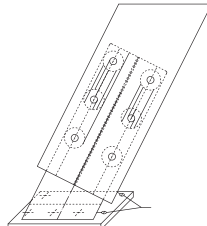
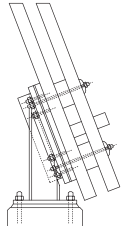


Ejemplos de detalles de fijación de la estructura

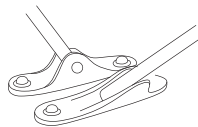
Ⓐ Bambú



Ⓑ Madera



Ⓒ Metal



FIJACIÓN DE LA ESTRUCTURA

El borde de la Grid Shell es el que recibe todos los esfuerzos de la estructura, llegando a los soportes y de ahí al suelo. Los modelos (analogicos y digitales) sirven como base para delimitar los bordes.

Hay dos tipos de borde.

I Bordes que terminan con la geometría de la retícula completa. En la estructura los bordes son arcos rígidos que se convierten en los soportes transmitiendo los esfuerzos al suelo.

II Bordes con la geometría de la retícula incompleta. Se distinguen dos tipos:

- i Bordes rígidos, actuando como arcos rígidos.
- ii bordes flexibles, generalmente de cable de acero.

Una vez que los bordes están delimitados, se decide el tipo de soporte que cargará toda la estructura, generalmente en los bordes rígidos van hacia cimentaciones puntuales, las Grid Shells en las que todo el perímetro llega al suelo van sobre cimentaciones corridas o sobre muros de carga.

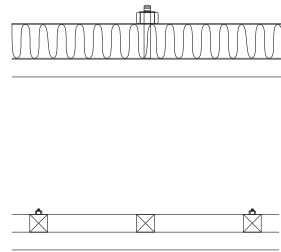
Al ser una estructura ligera y de doble curvatura, la estructura puede auto soportarse, por lo tanto la cimentación y demás soportes son los mínimos. La mayoría de los ejemplos construidos han utilizado soportes como zapatas rellenas de arena, o simplemente un refuerzo en suelo para evitar que la estructura tienda a volver a su posición original (una retícula plana).

Materiales para colocar en cubierta

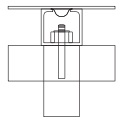
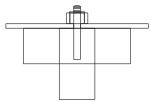
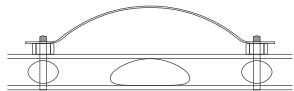
a Tejidos



b Paneles



c Metal y Plásticos



CUBIERTA

Además de proteger la Grid Shell del viento, sol, lluvia o cualquier condición ambiental externa, el objetivo de tener una cubierta es agregar mayor rigidez a la estructura a través del material que la cubre.

Dependiendo de la elección del material es la estabilidad extra que puede aportar a la estructura, sin embargo una característica que debe tener cualquier material para ser considerado es la capacidad de tomar las curvaturas de la estructura, esto es debe tener cierta elasticidad.

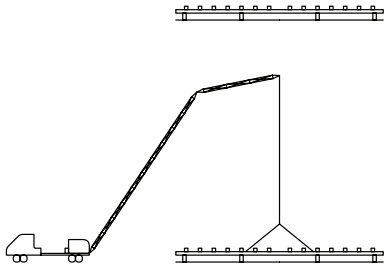
Los materiales que han sido usados como cubiertas de Grid Shells son:

- Tejidos. Si las fibras del tejido están en diagonal a la malla, éstas pueden agregar mayor rigidez, por otro lado esto representa mayor desperdicio de material.
- Paneles de Madera. Usados generalmente para homegenizar toda la estructura, éstos paneles son fáciles de colocar ya que puede ir clavados.
- Metal. Láminas delgadas de metal a lo largo de la estructura.
- Plásticos o Materiales Compuestos. Frecuentemente se usan plásticos translúcidos para permitir el paso de la luz natural al interior.

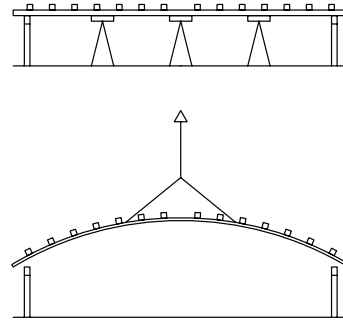
ESTRATEGIAS DE MONTAJE

Ejemplos de estrategias de montaje

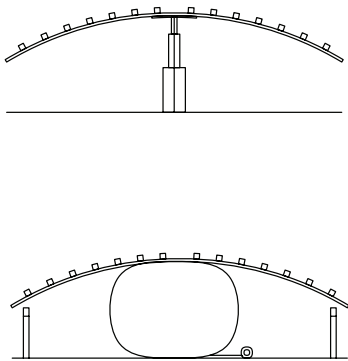
a Montaje con grúa



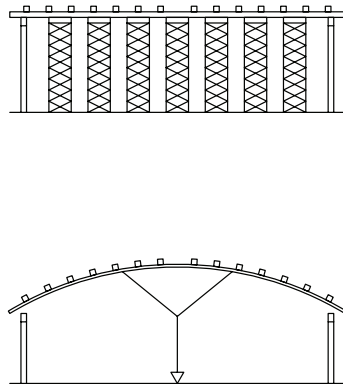
c Montaje con elementos verticales



b Montaje con estructura inflable



c Montaje con andamios



Las Grid Shells son estructuras ligeras, por lo tanto su construcción y transportación no requiere de poca energía.

Como se mencionó en el primer capítulo, una de las particularidades de las Grid Shell es que deben de partir de barras rectas montadas sobre una superficie plana para después ser deformadas. La longitud de las barras está condicionada por la dimensión máxima permitida para que puedan ser transportadas. En Grid Shells de gran escala la estructura es transportada y armada por secciones para en sitio unir toda la estructura.

Un ejemplo es el Multihalle Pavillion, fue construido y deformado por secciones. Cada sección al ser parte de una geometría auto soportante era estable por sí misma, al final se unieron todas las partes para crear el conjunto.

La retícula (de una o dos capas) es colocada en el suelo, los nodos que unen las barras entre sí, durante la etapa de montaje, debe permitir la rotación de las mismas. Una vez deformadas las diagonales son colocadas, los nodos se fijan y en caso de que el proyecto lo requiera la estructura es cubierta.

Existen distintos métodos para erigir las Grid Shells, dentro de los que destacan:

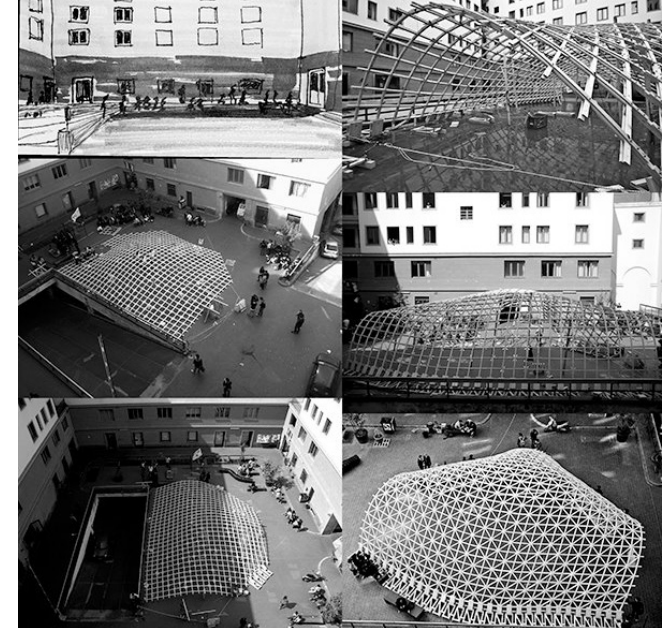
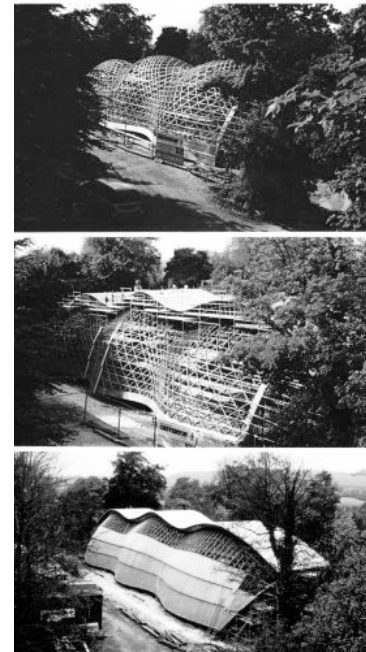
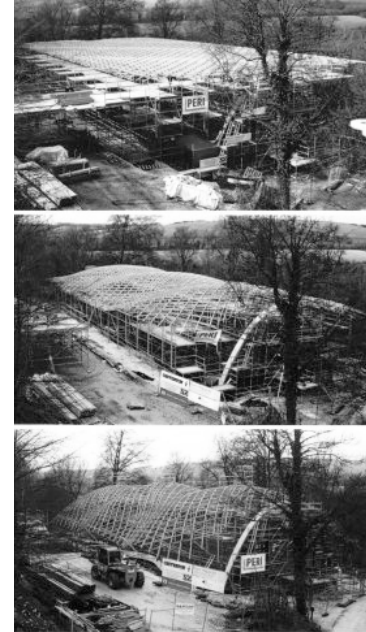
a Grúa telescópica. Las Grid Shells de pequeñas escala pueden ser levantadas con grúas para generar la forma, la estructura va colgado, los bordes se van fijando, hasta lograr la forma deseada.

b Estructura Inflable. Frei Otto propone como alternativa para un rápido montaje utilizar una estructura inflable que genere la forma desde el interior. No existe ningún caso construido con éste método.

c Elementos verticales. Se utilizan una serie de elementos verticales para levantar la estructura, colocados estratégicamente en el interior de la estructura, los cuales se van remplazo por elementos de mayor altura hasta lograr la altura deseada.

d Andamios. Dentro de los métodos mencionados es el único que no actúa en contra de la gravedad. Toda la retícula es elevada hasta la altura deseada, desplantándose en una base de andamios que lentamente son retirados para generar la forma. La primer Grid Shell que utilizó este método fue el Museo Downland.

ESTRATEGIAS DE MONTAJE



LÍNEA DEL TIEMPO

Para un mejor entendimiento de lo que ha sucedido con el desarrollo e innovaciones en la construcción de Grid Shells se desarrolla una línea del tiempo. En la que se puede observar las diferentes escalas propuestas, posibilidades arquitectónicas, además de la influencia de Frei Otto para que los diseños se convertirán en objetos construidos.

En la investigación realizada se puede observar que desde la primer Grid Shell propuesta hasta la realizada para el pabellón Japonés de Hannover (1962-2000) Frei Otto estuvo involucrado directa o indirectamente en el proceso de diseño y construcción de los distintos ejemplos, promoviendo la divulgación de este tipo de estructuras.

Los primeros proyectos, Essen, Berkely y Montreal, fueron construidos y diseñados a través de la exploración con modelos analógicos.

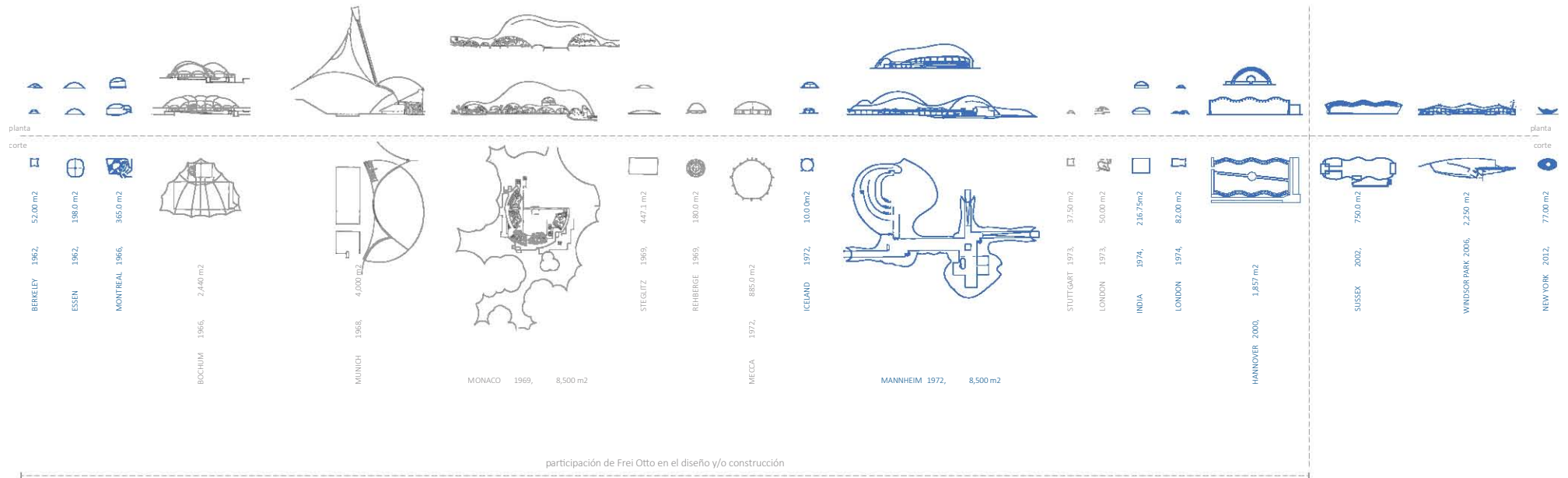
No se encontró alguna razón por la que distintos proyectos diseñados no se llevaron a la fase ejecutiva. Sin embargo la comprobación de su estabilidad y durabilidad influyó para la realización de más proyectos. La exploración y entendimiento del material condujo estas investigaciones al ámbito escolar.

Los ejemplos construidos varían de los 50m² hasta los 8,500 m² con distintos claros posibles, lo que demuestra las infinitas posibilidades que pueden a llegar a tener los espacios interiores.

Las formas van desde superficies de una sola curvatura como los domos hasta formas libres, todas bajo los principios de la búsqueda de la forma y equilibrio, desarrollados anteriormente.

Cada ejemplo sirve de base para el siguiente proyecto, entendiendo las dificultades y generando innovaciones en el tema.

EVOLUCIÓN DE GRID SHELLS



CASOS DE ESTUDIO

La descripción de los proyectos de los casos de estudio están presentados cronológicamente. Las particularidades más importantes de cada Grid Shell están resumidas en una tabla. Las características de los detalles constructivos se representan en esquemas, y la información es complementada con una serie de fotografías de cada proyecto.

A pesar de las diferencias en la forma, tamaño y material, el tamaño de la malla de la mayoría de los proyectos tiene aproximadamente 50 cm de separación entre barra y barra, en ambas direcciones. La razón del ancho de malla es por la posibilidad de manejarse en forma segura y sin complicaciones durante su montaje. Un ejemplo es que las personas pueden realizar trabajos como fijación de los nodos o recubrimiento de la estructura sin el riesgo de caerse, no importando la altura final del objeto arquitectónico.¹

La selección de los casos de estudio fue con base a la información disponible para poder hacer la comparativa entre todos los casos de estudio, así como el impacto que tuvo cada una en relación a las innovaciones tecnológicas en el ámbito del diseño y la construcción.

Los primeros tres casos de estudio, Mannheim, Hannover y Sussex, fueron diseñados y construidos con la ayuda de modelos analógicos y maquetas a escala de secciones de la estructura llevadas al límite para entender el comportamiento del material.

Los demás ejemplos se diseñan con la ayuda de distintos softwares. El entendimiento del material y comportamiento de la estructura se logra a través de la manipulación de información reflejada en un modelo digital, el resultado será una aproximación a la realidad.

Las posibilidades de construir Grid Shells, van desde una estructura muy pequeña, que puede ser calculada y diseñada con la ayuda de modelos analógicos hasta la construcción de la más compleja que necesita la asesoría de especialistas y software para poder desarrollarla.

La realidad es que las Grid Shell abren una nueva posibilidad en el ámbito arquitectónico. Cuando se logró comprender el comportamiento estructural y las leyes bajo las que se tiene que diseñar, se comenzaron a construir y divulgar más este tipo de estructuras, con la colaboración de distintas disciplinas, principalmente arquitectos e ingenieros.

1 IL 10 Grid Shells (1974), Stuttgart: Institute of Lightweight Structures, University of Stuttgart.

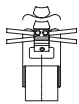
MANNHEIM MULTIHALLE

| | | | |
|---------------|-----------------------|-------------------------|--|
| Arquitectura: | Mutschler + Frei Otto | M2: | 7,400m ² |
| Ingeniería: | Frei Otto + ARUP | Dimensiones: | 160m largo, 115m ancho 20 m altura |
| Cliente: | Federal Garden Show | Tiempo de Construcción: | 1 año |
| Lugar: | Mannheim, Alemania | Material: | Madera, pino |
| Año: | 1975 | | |

Fuentes de información de datos: tectonicablog.com

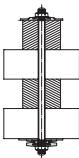
Estructura Temporal. El diseño estuvo basado en la propuesta de un pabellón cuyos materiales pudieran ser reciclados cuando fuese desmontado. Para el montaje la retícula de tubos de papel se colocó sobre un andamio temporal que luego fue utilizado para empujar la malla hasta la forma final. Una segunda estructura de madera fue colocada y conectada a la estructura principal de los tubos para darle la rigidez requerida por el gobierno Alemán.

CUBIERTA:



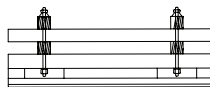
Membrana de PVC traslúcido recubierto de poliéster, con un entramado de 5 cm de ancho, clavado en tiras, sin un patrón en específico

NODO:



Placa metálica de ambos lados de la barra. Pernos con acabado de cadmio, pre-tensados de 8 mm de diámetro, con rondanas y tuercas en los dos lados.

BARRAS:

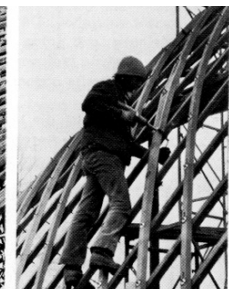


Barras de 5 x 5 cm, con uniones, tipo cola de pato, logrando una barra continua hasta de 30m de largo. Doble capa de barras en la mayor parte de la estructura.

FIJACIÓN DE LA ESTRUCTURA:



Los límites de la estructura llegan a columnas de tubos de acero de 250 x 5mm. La cimentación es de concreto armado y su conexión a la columna es a través de piezas de acero galvanizado atornilladas



MANNHEIM MULTIHALLE



(c) by Waldemar Eibel

JAPAN PAVILION

| | | | |
|---------------|--------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| Arquitectura: | Shigeru Ban | M2: | 3600m2 |
| Ingeniería: | Frei Otto + B. Happold | Dimensiones: | 72m largo, 35m ancho 16m altura |
| Cliente: | Japan External Trade Organization | Tiempo de Construcción: | 3 semanas |
| Lugar: | Hannover, Alemania | Material: | Tubos de cartón |
| Año: | 2000 | | |

Fuentes de información de datos: detail-online.com

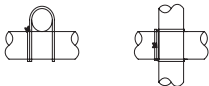
Estructura Temporal. Estructura curvada en dos direcciones, consiste en tubos de cartón de 12,5 cm de diámetro y de hasta 40m de largo . Atadas con tiras de poliéster , la estructura se apoya por elementos de una segunda estructura de madera. La cubierta es un tejido textil y papel especial impregnado. Bajo consumo de energía y la sostenibilidad ambiental fueron fundamentales para el concepto , que prevé el reciclaje de todos los materiales después de que el edificio se desmontó .

CUBIERTA:



Hay dos membranas que cubren la estructura, la primera de papel y la adición de una segunda membrana de PVC traslúcido.

NODO:



Al ser de sección circular el nodo envolvía ambas barras para mantenerlas en su posición y en algunos casos ambas barras fueron perforadas para asegurar su posición.

BARRAS:



La estructura principal fue realizada con tubos de papel; 440 tubos de cartón de 12cm de diámetro, hasta 40m de longitud. La estructura secundaria fue de madera. Las diagonales de acero.

FIJACIÓN DE LA ESTRUCTURA:



La cimentación se componen de cajas hechas con marcos de acero y zapatas rellenas con arena para una fácil reutilización posterior.



JAPAN PAVILION



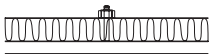
WEALD AND DOWNLAND OPEN AIR MUSEUM

| | | | |
|---------------|---------------------------------------|----------------------------|---|
| Arquitectura: | Edward Cullinan | M2: | 1800 m2 |
| Ingeniería: | Buro Happold | Dimensiones: | 48m largo, 12.5-16 m ancho 7.5-9.5 m altura |
| Cliente: | Weald and Downland Open Air Museum | | |
| Lugar: | Sussex, Inglaterra | Tiempo de Construcción: | 1 año |
| Año: | 2002 | Material: | Madera, Roble |

Fuentes de información de datos: cullinastudio.com

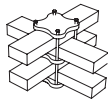
Estructura Permanente. El diseño estuvo basado en potencializar los recursos de la zona. El edificio es de dos niveles. El sótano se utiliza como bodega del Museo, mientras que el espacio superior funciona como taller enfocado en la conservación de edificios de madera. La retícula inicial se generó sobre una base de andamios, los bordes fueron bajados gradualmente hasta tomar la forma final, fijados a la base del sótano. Se estima que se usaron 12 Ton de madera.

CUBIERTA:



El revestimiento consiste de una membrana de poliestireno reforzado (aislante), una membrana de papel y finalmente el revestimiento de madera.

NODO:



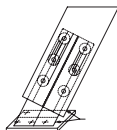
El nodo consta de tres placas de metal y tornillos de acero. Las placas exteriores sostienen las barras en su lugar, permitiendo el movimiento el dar forma. La tercer placa actuará como un refuerzo a las barras al final de la deformación.

BARRAS:



La estructura tiene doble capa de barras en cada dirección. Una quinta capa, las diagonales, aumentan la rigidez de la estructura. 600 barras de madera fueron utilizadas, la longitud de la barra más larga fue de 37m.

FIJACIÓN DE LA ESTRUCTURA:



Los extremos de la Grid Shell se sostienen a través conectares metálicos que a su vez están cimentados a la estructura del piso inferior (sótano) a través de conexiones de acero



WEALD AND DOWNLAND OPEN AIR MUSEUM



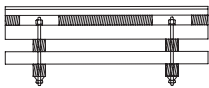
TOLEDO GRID SHELL

| | | | |
|---------------|--|-------------------------|---------------|
| Arquitectura: | Andrea Fiore Daniele Lancia | Material: | Madera, roble |
| Ingeniería: | Bernardino D'Amico Francesco Portioli | Año: | 2012 |
| Cliente: | Naples School of Arch | M2: | 96 m2 |
| Lugar: | Nápoles, Italia | Tiempo de Construcción: | 4 semanas |

Fuentes de información de datos: gridshell.it

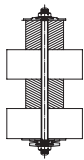
Estructura Temporal. El diseño estuvo basado en la propuesta de un pabellón sostenible y con innovación en la construcción. La estructura es el resultado final de la tesis de maestría: "Digital Form-finding of Timber Post-formed Grid Shell". El tema principal es el desarrollo de una herramienta para la búsqueda de la forma de manera digital de una Grid Shell. Enfocándose en la simulación en tiempo real del comportamiento de los materiales, comparado con proceso de construcción.

CUBIERTA:



No toda la estructura está cubierta. Tiras de laminado de madera se utilizaron para generar sombra en el espacio interior.

NODO:



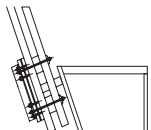
Por tratarse de una estructura experimental, en los nodos se usaron tornillos y rondanas de acero que perforan todas las barras de la retícula.

BARRAS:



Para las barras se utilizó el roble como material seleccionado. La estructura cuenta con dos capas de barras en cada dirección de la superficie.

FIJACIÓN DE LA ESTRUCTURA:



La cimentación se componen de cajas hechas con madera, rellenas de arena, apoyándose sobre bancas de piedra para evitar que la estructura tienda a una retícula plana.



TOLEDO GRID SHELL



PORTAL OF AWARENESS

| | | | |
|---------------|-----------------------------------|----------------------------|--|
| Arquitectura: | Michel Rojkind Gerardo Salinas | M2: | 42 m2 |
| Ingeniería: | A. Willem de Jongh | Dimensiones: | 7.0 m largo, 7.30 m ancho 4.50- 3.25m altura |
| Cliente: | Nescafé | Tiempo de Construcción: | 2 semanas |
| Lugar: | D.F, México | Material: | Varilla corrugada |
| Año: | 2012 | | |

Fuentes de información de datos: archdaily.com

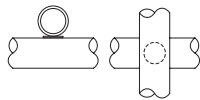
Estructura Temporal. El diseño estuvo basado en la idea de unir un objeto cotidiano, la taza, con un material arquitectónico de construcción básico, la varilla corrugada. La varilla es usada como la estructura principal para las tazas, que son unidas mecánicamente a cada intersección de la malla de acero.

CUBIERTA:



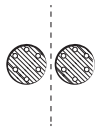
La estructura en su mayoría no tiene cubierta, sin embargo se utiliza vegetación, enredaderas, para generar sombra al interior.

NODO:



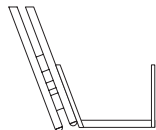
Su montaje fue a través de la deformación de cada una de las barras, por lo tanto el nodo que permitiera el movimiento no era viable. Todas las uniones soldadas.

BARRAS:

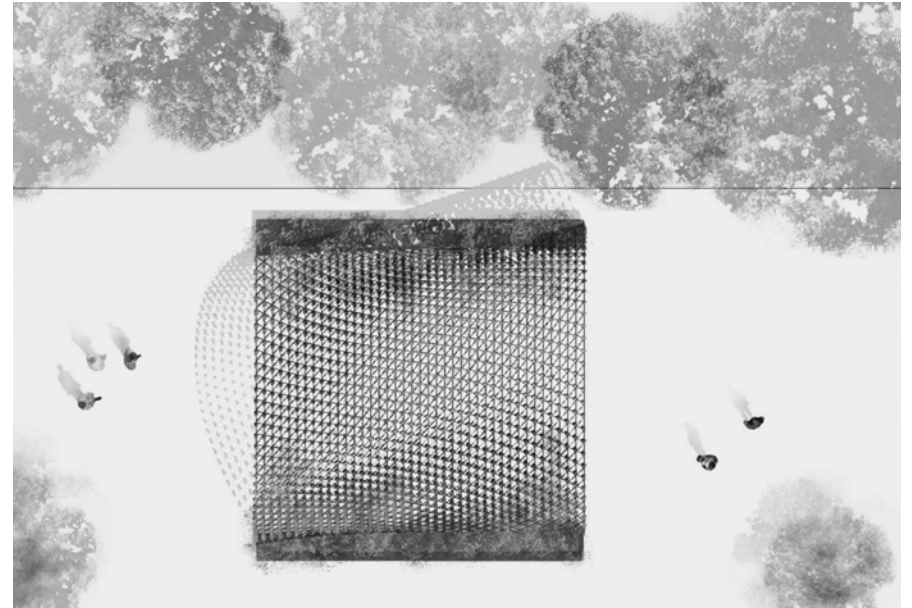


La pieza es entretejida combinando 41 arcos principales, variando en longitud de 10 a 12 metros, con dos capas adicionales de 56 diagonales cada una, que crean 1497 nodos para las tazas.

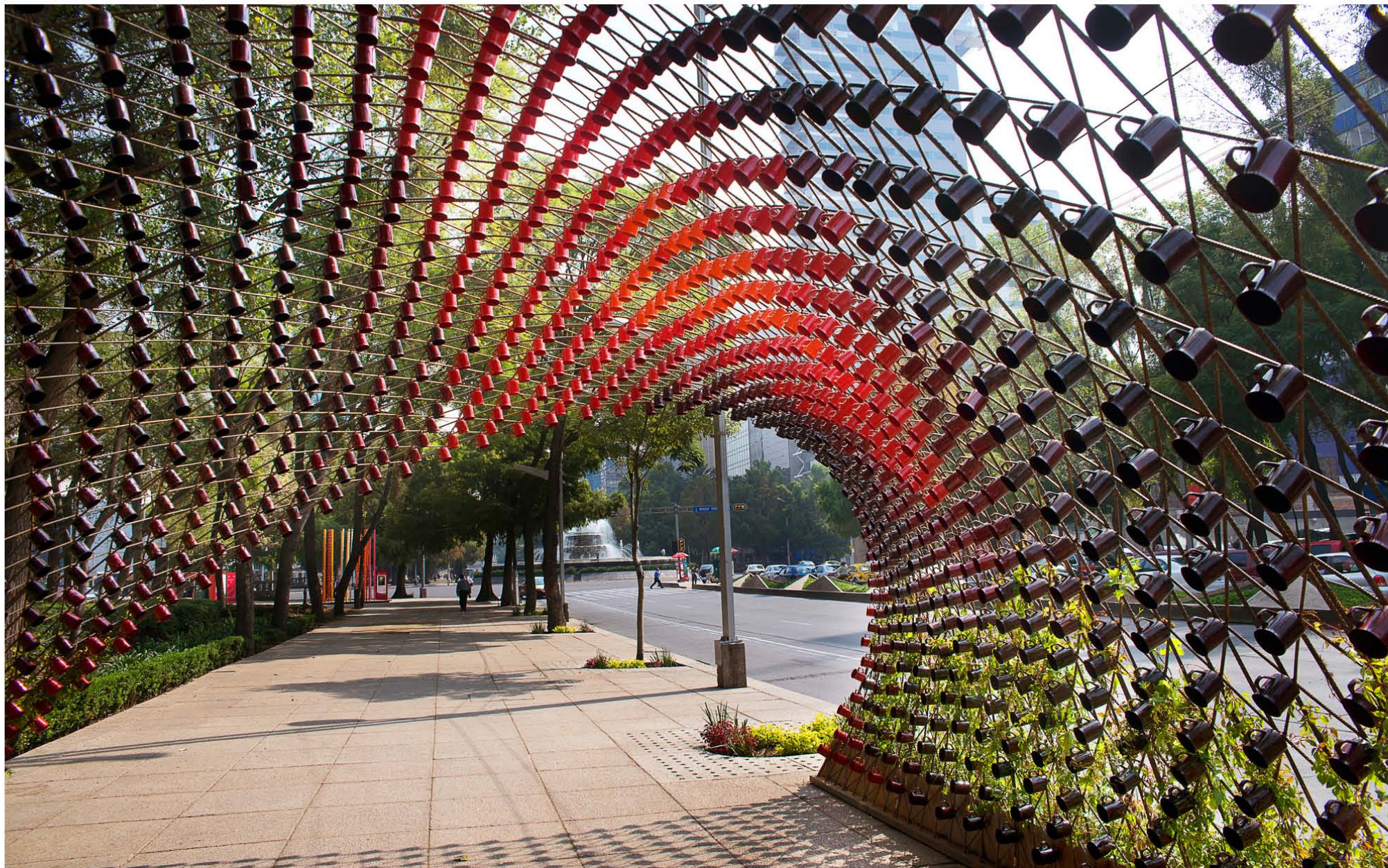
FIJACIÓN DE LA ESTRUCTURA:



Las macetas de acero anclan la estructura y permiten que las enredaderas crezcan entre las varillas con la idea de que éstas cubran todo el exterior.



PORTAL OF AWARENESS



DIGITAL TECTONICS

| | | | |
|---------------|-------------------------------------|----------------------------|---|
| Arquitectura: | Mark Cabrinha | M2: | 77 m ² |
| Ingeniería: | M. Cabrinha, D. Shook A. Kudless | Dimensiones: | 11 m largo, 7 m ancho 14 m altura |
| Ciente: | Smart Geometry | Tiempo de Construcción: | 4 días |
| Lugar: | N.Y, Estados Unidos | Material: | Listones de madera |
| Año: | 2012 | | |

Fuentes de información de datos: matsysdesign.com

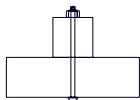
Estructura Temporal. La fundamentación del taller es el entendimiento del material como la manera más sostenible de construcción. El material se convierte en el parámetro de diseño. A diferencia de los casos de estudio anteriores la construcción no se basa en una retícula plana desarrollada en el suelo. Se toman los principios para el diseño de Grid Shells, doble curvatura, barras rectas y deformación del material, generando la superficie a través de líneas geodésicas.

CUBIERTA:



Se desarrolla en un espacio interior, por lo tanto no existe cubierta.

NODO:



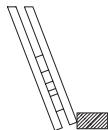
En los nodos se usaron tornillos y rondanas de acero que perforan todas las barras de la retícula.

BARRAS:



Dos capa de barras muy delgadas que permiten la deformación de la madera sin la necesidad de mojarla.

FIJACIÓN DE LA ESTRUCTURA:



Al ser una superficie de doble curvatura, tiende a auto soportarse, por lo tanto los límites de la estructura simplemente son barras de madera ancladas al suelo.



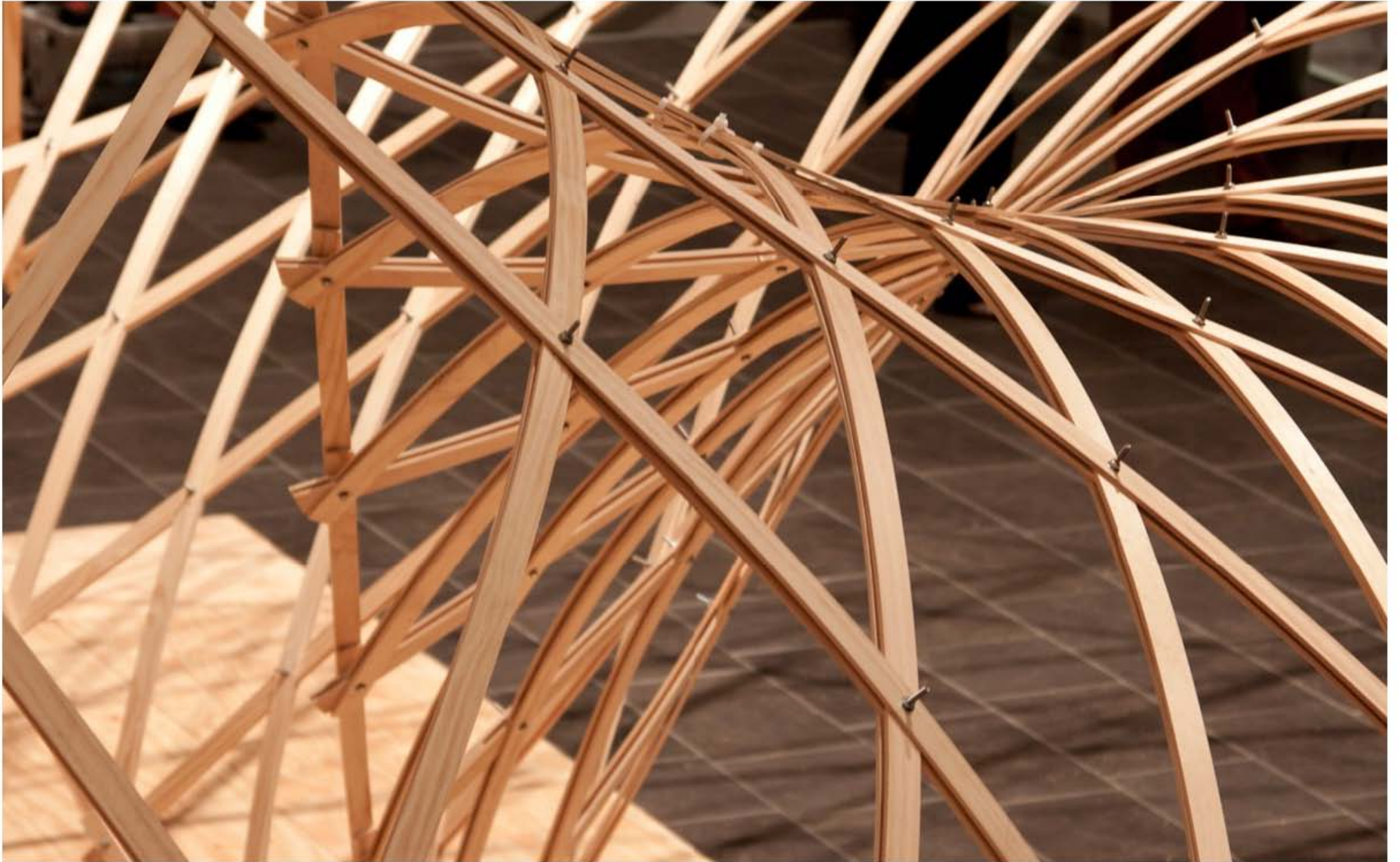






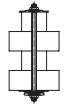
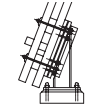


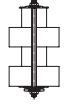
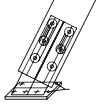
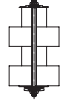
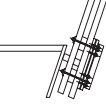


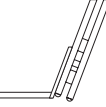


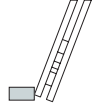


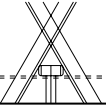

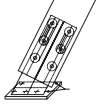

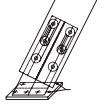
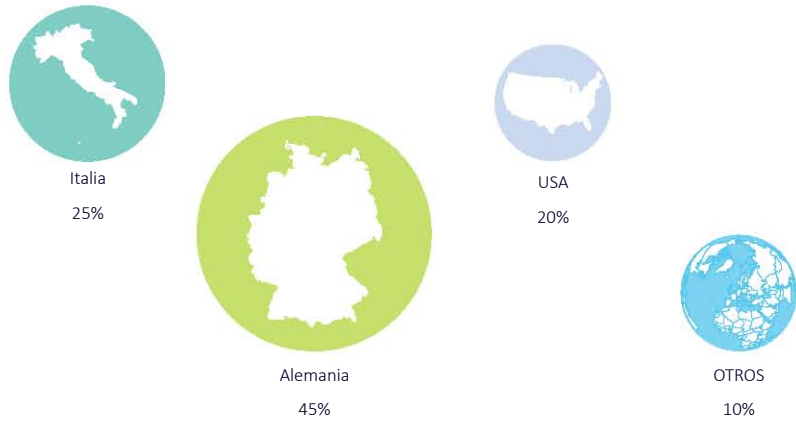


TABLA COMPARATIVA

| |  AÑO Y LUGAR |  ESCALA |  MATERIAL |  CUBIERTA |  NODO |  FIJACIÓN DE LA ESTRUCTURA: |  TIEMPO DE CONSTRUCCIÓN |
|-----------------------------------|---|--|--|--|--|--|--|
| MANNHEIM PAVILLION | Mannheim, Alemania. 1975 | XL 7,400 m ² | Listones de madera de pino. | Membrana de plástico. |  |  | 52 Semanas |
| JAPAN PAVILLION | Hannover, Alemania. 2000 | L 3,600 m ² | Tubos de cartón, estructura de madera de pino | Membrana de plástico transparente. |  |  | 3 Semanas |
| DOWNLAND MUSEUM | Sussex, Inglaterra. 2002 | M 1,800 m ² | Listones de madera de roble. | Madera, policarbonato y lámina. |  |  | 52 Semanas |
| TOLEDO GRID SHELL | Nápoles, Italia. 2012 | S 96 m ² | Listones de madera de Roble | Laminado de madera |  |  | 4 Semanas |
| PORTAL OF AWARENESS | Distrito Federal, México. 2012 | XS 42 m ² | Varilla corrugada de distintos diámetros. |  Sin cubierta |  |  | 2 Semanas |
| DIGITAL TECHTONICS | Nueva York, USA. 2012 | S 77 m ² | Secciones de triplay (pino). |  Sin cubierta |  |  | 1/2 Semanas |
| casos de estudio complementarios: | | | | | | | |
| EXPERIMENTAL GRID SHELL | Berkeley, USA. 1962 | XS 52m ² | Varilla corrugada. |  Sin cubierta |  |  | 1 Semanas |
| EXHIBITION PAVILLION | Essen, Alemania. 1962 | S 198 m ² | Listones de madera de pino. | Membrana de plástico transparente. |  |  | 1 1/2 Semanas |
| DIFFERENTIATED WOOD LATTICE SHELL | Massachusetts, USA. 2009 | S 60 m ² | Listones de madera de pino. | Laminado de madera |  |  | 2 Semanas |

CONCLUSIONES DE CASOS DE ESTUDIOS ANALIZADOS

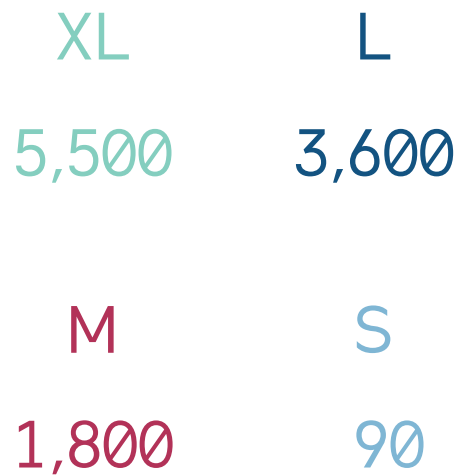
① Relación de exploración de Grid Shells de acuerdo al país.



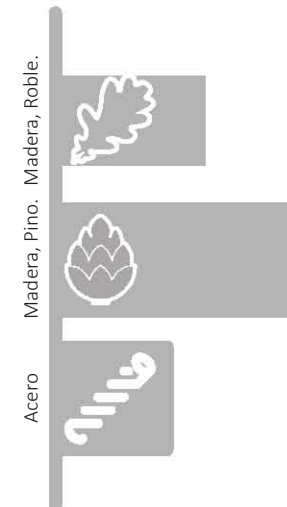
③ Promedio de metros cuadrados construidos vs tiempo.



② Promedio de metros cuadrados contruidos de acuerdo a la escala.



④ Relación de materiales elegidos para construcción.



CONCLUSIONES

Como cualquier proceso existen distintas formas de abordar un problema es la conjunción de todas las soluciones que definen las ventajas que tiene utilizar, explorar e implementar cierta técnica para lograr el resultado final.

La importancia que tuvo Frei Otto para la divulgación de este sistema fue de suma importancia. Los concursos y programas universitarios enfocados al entendimiento del material impulsaron la divulgación de este tipo de sistemas.

Las múltiples posibilidades de forma, acotadas por las restricciones de los materiales hacen de las Grid Shells espacios confinados por una sola superficie que actúa como cubierta, como muro, ventana, o vacío. La calidad de los espacios interiores es aparentemente compleja por la forma pero geométricamente muy sencilla.

La Grid Shell del Downland Museum es en especial la que más innovaciones ha aportado a la evolución de Grid Shell, desde el diseño del nodo, la diversidad de materiales, así como la forma de montaje, en especial utilizando la gravedad como una fuerza a favor y no en contra de ella. También se puede observar el dominio que tiene la madera como material para la construcción, sin embargo el acero y plásticos o materiales compuestos comienzan a aparecer en el diseño.

A pesar que se construyen con el objetivo de ser estructuras temporales, existen dos ejemplos que demuestran su permanencia; el primero es el Multihalle de Mannheim construido en 1975, con 40 años de vida únicamente se han remplazado en algunas partes secciones de barras. El segundo ejemplo es el Downland museum construido en 2002 sin ningún inconveniente reportado a la fecha.

El deseo experimentar y el cambio continuo de pensamiento en el proceso de diseño, así como su aceptación, ha impulsado la construcción de Grid Shells.

CAPÍTULO

04

PABELLÓN EXPERIMENTAL

PLANTEAMIENTO DEL PABELLÓN

Por invitación del arquitecto Eric Valdez profesor de la asignatura de Construcción VI del Taller José Villagrán de la Universidad Nacional Autónoma de México, se impartió un Workshop enfocado a la experimentación de la materia y el uso de herramientas digitales.

Una oportunidad para sacar del aula los conocimientos y ponerlos en práctica, dar a conocer el uso de herramientas digitales y sus posibilidades en el diseño arquitectónico, así como la participación de distintos actores especializados en ramas diferentes.

Se centró en el diseño y construcción de una Grid Shell de madera, con una retícula de barras rectas, las cuáles se deformaron posteriormente. Es una propuesta de construcción y utilización de los materiales diferente a lo que normalmente nos enseñan. Siguiendo los principios de Forma-Fuerza-Materia el resultado de la forma es el proceso de las interacciones dentro de un sistema que consta de elementos con relaciones y limitaciones predefinidas. Se desarrollaron una serie de modelos análogos que complementaron el uso de herramientas digitales, fundamentales para el diseño, simulación y fabricación de la estructura.

El pabellón experimental no sólo busca demostrar los beneficios de usar herramientas digitales en el proceso de diseño, sino también muestra la aplicabilidad de la madera como material de construcción renovable en la generación de formas geométricas de gran complejidad.

EL taller teórico tuvo una duración de tres días, la fabricación y construcción de 6 días. El programa se estructuró de la siguiente manera:

- Día 01 Conferencia sobre estructuras ligeras, y Grid Shells.
- Día 02 Explicación del uso de herramientas digitales.
- Día 03 Concurso de diseño entre los equipos de estudiantes.
- Día 04 – 09 Fabricación y montaje de estructura.

El proyecto no habría sido posible sin el apoyo de Yoshio Fukumori y el compromiso y paciencia de los estudiantes hacia el tema y desarrollo del proyecto, reflejando en el objeto final la esencia de ésta tesis. Construyendo el pabellón los alumnos lograron entender principios de comportamiento estructural empleando las herramientas que les fueron proporcionadas al comienzo del taller.

¡INFINITAS GRACIAS A TODOS ELLOS!

Diseño, asesoría y construcción de la Grid Shell

Paola Tovar / Yoshio Fukumori

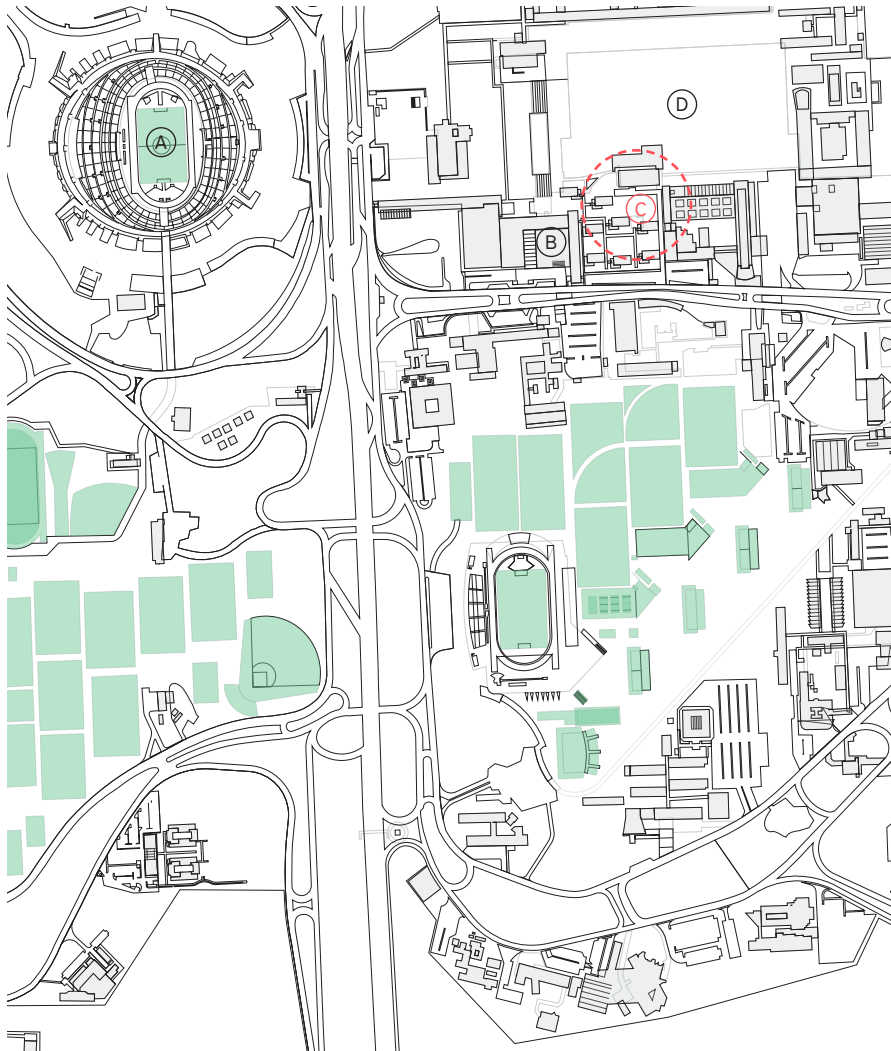
Profesores del Taller de Construcción VI del Taller José Villagrán

Eric Valdez / Fernando Flores

Alumnos Participantes

Diego Águeda / Daniela Abrego / Carlos Aura / Andrea Campos / Laura Colín / Danae Contreras / Patricia Cortez / Iván Cuevas / Andrea Díaz / Ezequiel Felipe / Alma Feroso / Víctor García / Alberto Garduño / Adriana Garrido / Claudia González / Víctor Granados / Jonathan Juárez / Alan Juárez / Alíz Martínez / Luz Matamoros / Fernanda Miranda / Saraid Molotla / Gabriela Monroy / Pilar Moreno / Isabel Muñoz / Ibrajím Muñoz / Carolina Ponce De León / Pablo Ramírez / Carlos Reyes / Juan Reynoso / Nelly Rodríguez / Martha Ruíz Velasco / Kepler Sánchez / Ramón Sánchez / Javier Sandoval / Cristina Sosa / Angélica Torres / Julio Velasco / Elena Villagómez / Fernanda Villanueva.

① Ubicación de pabellón



- A Estadio Olímpico Universitario
- B Facultad de arquitectura
- C Patio de los huesitos
- D "Las Islas"

SELECCIÓN DEL SITIO

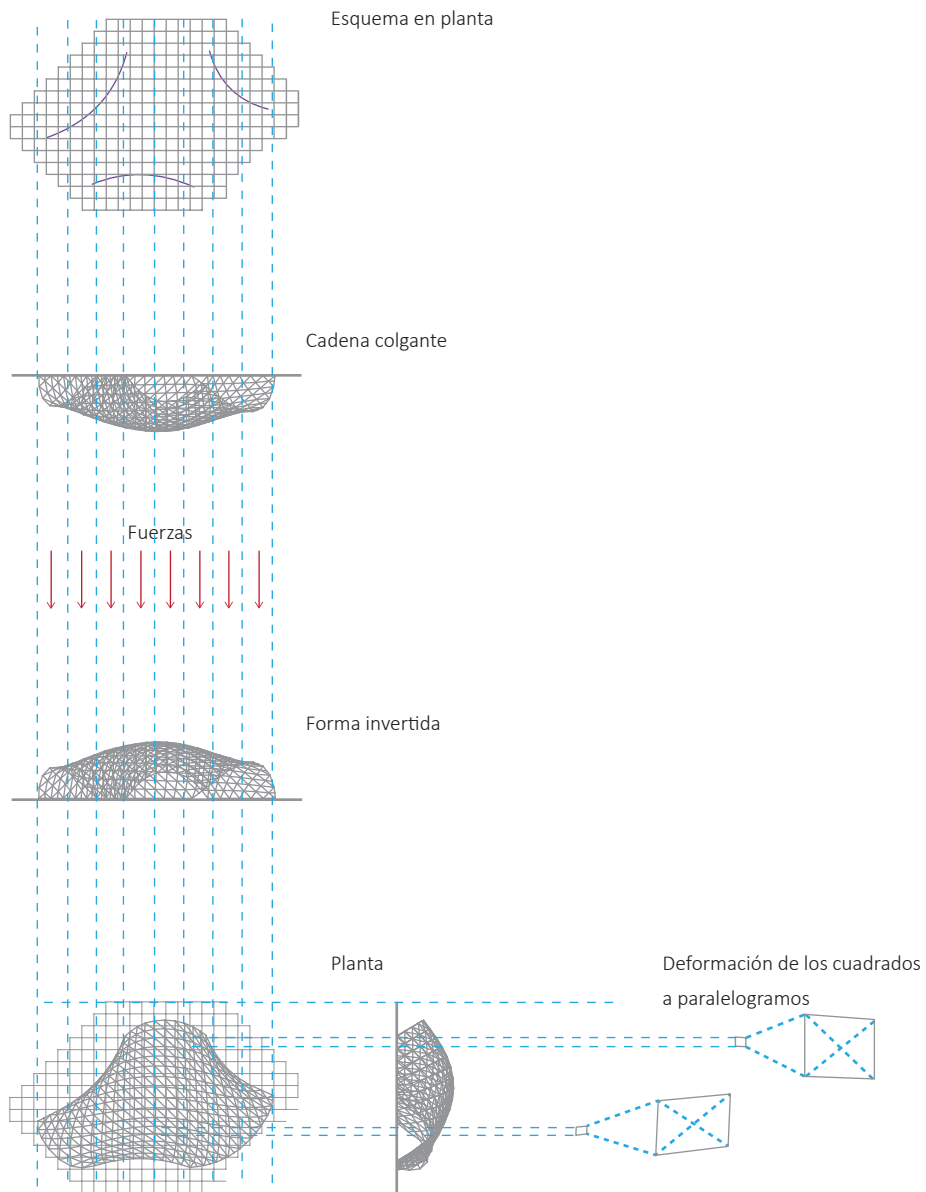
El emplazamiento del pabellón experimental se exploró dentro de la facultad de arquitectura y cerca de ésta, siendo una decisión difícil por las ventajas que tiene cada espacio dentro de nuestra Universidad. El objetivo era ubicar el objeto arquitectónico donde existiera un flujo constante de peatones para dar a conocer el trabajo realizado, promoviendo de ésta manera este tipo de actividades en el día a día dentro de nuestra Universidad.

Las consideraciones primordiales fueron: buscar una zona de trabajo donde no se interrumpieran las actividades de la facultad, el acceso a la electricidad para el uso de herramientas, y la accesibilidad para llevar los materiales con la trayectoria más corta.

El sitio elegido fue el espacio conocido como "El patio de los huesitos". Esta zona en particular tiene un carácter de tranquilidad y fácil accesibilidad, por el estacionamiento de maestros o directamente desde las islas. Las múltiples direcciones a donde te distribuye el espacio hacen que el tránsito de peatones sea constante. Por los servicios existentes como el de comida y papelería hace del lugar un punto de encuentro entre los estudiantes.

Era necesario encontrar una manera de fijar el pabellón sin deteriorar el pavimento existente, el mobiliario de la zona elegida fue decisivo para la elección del sitio y mantener la estructura en posición sin afectar lo existente. Se sabía que sería una estructura sin cubierta por lo tanto se necesitaba de alguna manera generar sombra al interior para poder habitar el pabellón durante el día, con la ubicación correcta del pabellón la vegetación existente ayudó a generar las condiciones de habitabilidad para que pudiera ser usado por los estudiantes durante el día.

② Esquema de la búsqueda de la forma



BÚSQUEDA DE LA FORMA

Gil Akos define la búsqueda de la forma como el proceso mediante el cual se llega a una forma basada en las interacciones dentro de un sistema dado, que consta de elementos con relaciones y limitaciones predefinidas¹, sin importar si es de manera analógica o digital.

¿Qué es lo que aporta la búsqueda de la forma al proceso de diseño?

El modelo físico es útil como primer acercamiento al comportamiento estructural de manera directa. No existe arbitrariedad en la realización de los modelos colgantes, éstos deben seguir los principios de la búsqueda de la forma (ver página 23). El resultado final es consecuencia del equilibrio entre el diseño, sus proporciones y peso propio. El modelo colgante es más que un simple método empírico es la aproximación inmediata a un problema.

La simulación digital es el procesamiento de información específica (módulo de elasticidad, módulo de ruptura, velocidad de viento, entre otros) a través de un sistema virtual para la determinación de la forma.

La comprobación estructural de manera analógica lleva mucho tiempo, sumado a la dificultad de construir el modelo colgante con la mayor precisión posible. En nuestros días es impensable invertir tanto tiempo en la solución de un problema.²

La práctica de la búsqueda de la forma aporta estructuras cuyas fuerzas son optimizadas, resultado del intercambio de información dentro de un sistema, donde el material influye en la determinación de la forma.

1 Akos, Gil. "Form Force MAtter." Pratt ARCH-527B. N.p., n.d.Web. 29 May 2013. <formforcematter.tumblr.com/> [Fecha de consulta: 28 junio2015]

2 Jos Tomlow, "El modelo colgante de Gaudí y su reconstrucción. Nuevos conocimientos para el diseño de la Iglesia de la Colonia Güell, Institute für leichte Flächentragwerke (IL), Universität Stuttgart, 1989.

www.informedelaconstruccion.revistas.csic.es [Fecha de consulta: 20 noviembre 2015]

MODELO DE CADENA COLGANTE

Existen diferentes materiales para realizar modelos de cadena colgante, el ejercicio de realizar maquetas con clips y empaques fue tomado de la clase “Form, Force, Matter” impartida en el Pratt Institute School of Architecture por el arquitecto Gil Akos.¹

Los modelos analógicos de grid shells simulan la retícula y forma final de la estructura sometida únicamente a esfuerzos de tracción consecuencia de su propio peso.

Los clips representan secciones de la retícula, mientras que los empaques simulan los nodos de conexión en las Grid Shells.

La mayor diferencia entre el comportamiento real y éste tipo de modelos radica que al ser secciones de barras (y no barras continuas como generalmente se construye) carecen de rigidez, cada sección puede tomar un ángulo diferente, rompiendo con la continuidad, resultando cuadrados y romboides desiguales entre sí.

Para mayor comprensión de la estructura se insiste en la utilización de modelos físicos.

Si bien es cierto que todo puede ser simulado y calculado de manera digital, el realizar modelos analógicos permite tener control visual sobre cada alteración que se hace a la estructura, percibiéndose de manera inmediata e identificable los cambios que sufre el modelo.

Se realizó el modelo analógico con clips y empaques como primer acercamiento al tema previo a la construcción del pabellón.

1 Akos, Gil. “Form Force MAtter.” Pratt ARCH-527B. N.p., n.d.Web. 29 May 2013. <formforcematter.tumblr.com/> [Fecha de consulta: 28 junio2015]

SIMULACIÓN DIGITAL

Después de realizar las simulaciones análogos y entendiendo el comportamiento del modelo cuando se somete a distintos esfuerzos, se desarrolló la simulación digital con dos objetivos: entender el proceso de generación de información para realizar una simulación digital y comparar resultados entre ambos procesos.

Las simulaciones digitales se realizaron utilizando las siguientes ecuaciones: la de equilibrio que enlaza las tensiones internas con las cargas aplicadas, y la ecuación que relaciona la tensión y deformación. Estas simulaciones permitieron explorar diferentes acercamientos donde el resultado formal es el proceso de las interacciones dentro del sistema.

Conceptos y ecuaciones empleadas para el desarrollo de la simulación digital¹:

-Ecuación de equilibrio: La suma de todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo es cero.

-Ecuación constitutiva: Es la relación entre las variables termodinámicas o mecánicas de un sistema físico: presión, volumen, tensión, deformación, temperatura, densidad, entropía, etc. Cada material o sustancia tiene una ecuación constitutiva específica, dicha relación sólo depende de la organización molecular interna.

-Elasticidad: Es un parámetro que nos indica la capacidad del material para resistir deformaciones, entre más alto sea su valor, más rígida es éste. El módulo de elasticidad es empleado en el diseño para predecir y controlar las deformaciones.

-Flexión mecánica: Se denomina flexión al tipo de deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal. El término "alargado" se aplica cuando una dimensión es dominante frente a las otras.

El rasgo más destacado es que un objeto sometido a flexión presenta una superficie de puntos llamada fibra neutra tal que la distancia a lo largo de cualquier curva contenida en ella no varía con respecto al valor antes de la deformación. El esfuerzo que provoca la flexión se denomina momento flector.

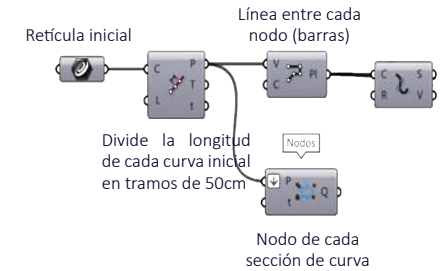
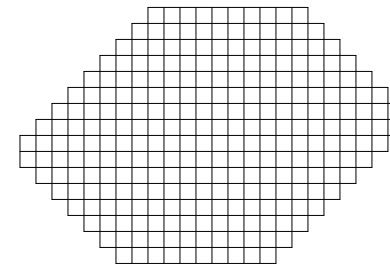
Plasticidad: Es la propiedad que hace que un material pueda deformarse fácilmente y de forma permanente, aplicando fuerzas de poca intensidad.

¹ Para profundizar sobre el tema las definiciones fueron obtenidas en: www.wikipedia.com

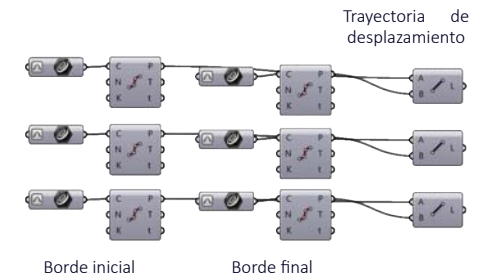
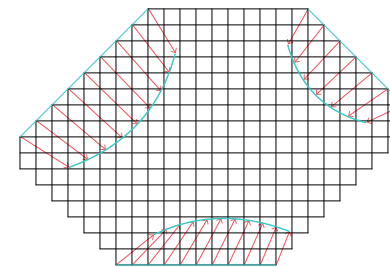
[Fecha de consulta: 20 agosto 2015]

DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN DIGITAL

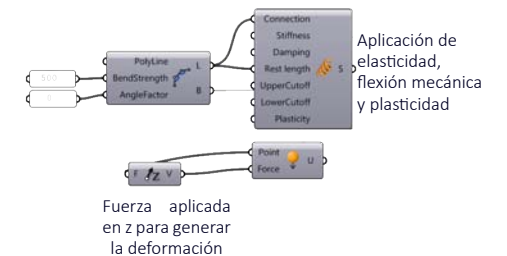
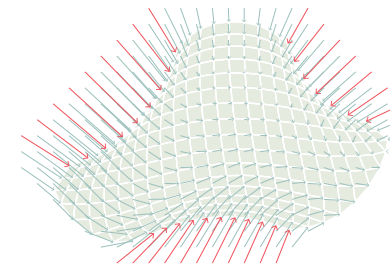
(A) Retícula inicial.



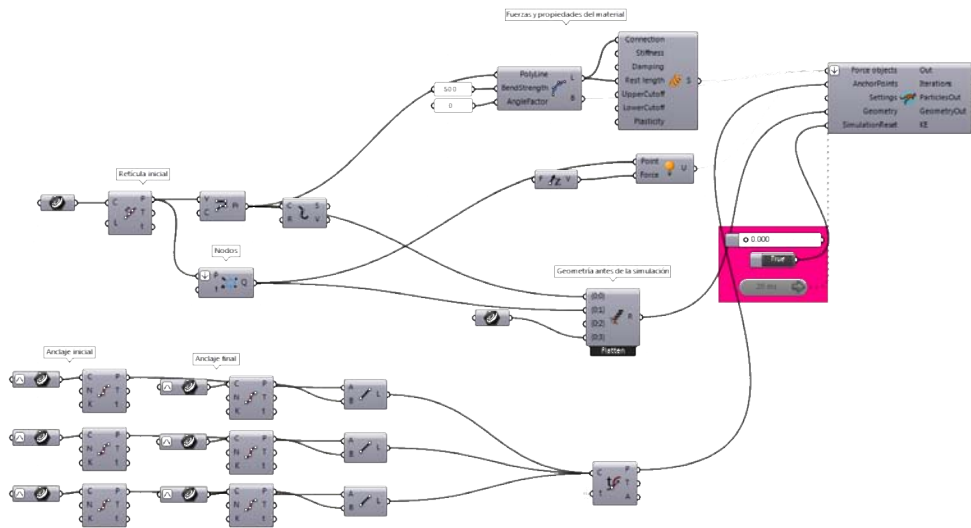
(B) Desplazamiento de los bordes.



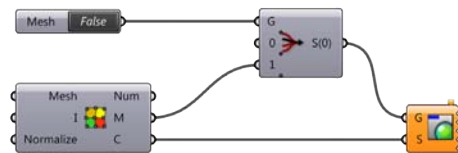
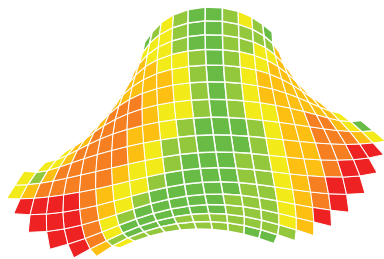
(C) Desplazamiento de los nodos.



D Simulación digital completa



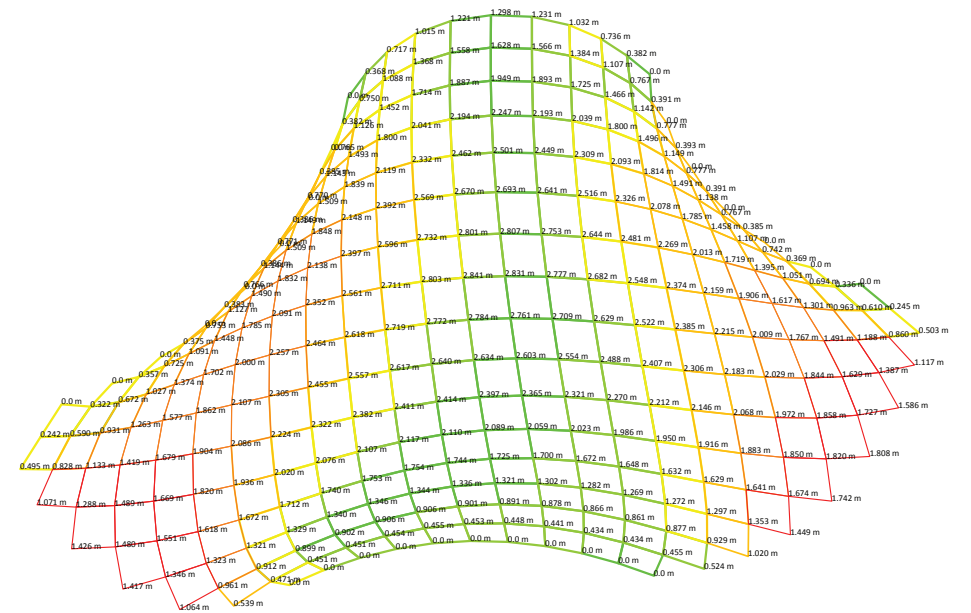
G Análisis de coplanaridad.



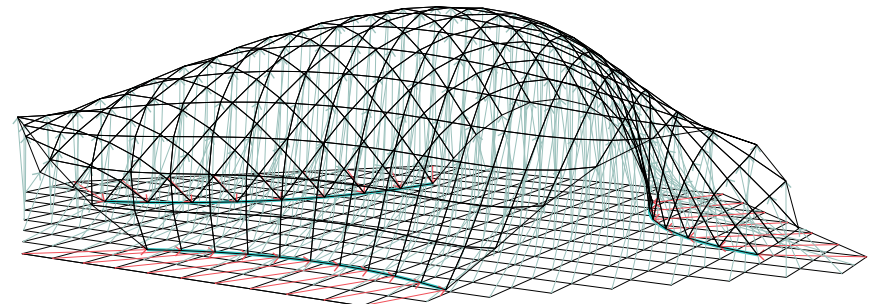
A cada cara le asigna un color de acuerdo al nivel de coplanaridad

Gradiente de color (+rojo menos coplanar, + verde mayor coplanaridad).

F Alturas finales de nodos de acuerdo a los resultados de la simulación



G Esquema de desplazamiento de los nodos y anclaje.



GEOMETRÍA

El diseño está fundamentado por el entendimiento de los casos de estudio, utilizados como referencia para dar solución a los problemas que nos enfrentamos. Una vez entendidas las características de una Grid Shell se fueron seleccionando los materiales, geometría, tipo de unión, entre otros.

Por la ubicación y las intenciones de uso se buscó generar tres accesos que permitieran el flujo constante de los estudiantes por el interior de la estructura.

Era la primera experiencia para todos nosotros realizar una Grid Shell, por lo tanto se simplificó la malla, con una geometría semejante a la de un rombo, y con una retícula cuadrangular, que al deformarse permitiría la formación de paralelogramos.

Se decidió que tres de sus lados descansarían sobre el suelo, teniendo como resultado en estos puntos una retícula incompleta con el propósito de evitar realizar una cimentación.

Se realizaron dos modelos analógicos y la simulación digital para suponer la forma final y como actuaría la malla.

En planta la malla extendida tiene 78m², y una vez deformada el espacio habitable es de 50m².

Existen sólo cuatro tipos de corte:

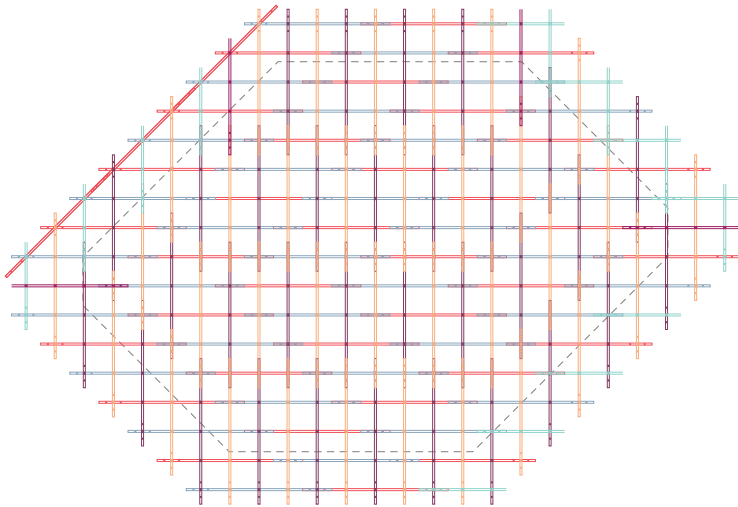
A) Barra de 2.44m de longitud, con cinco perforaciones para los nodos y dos más en los extremos para unirla a otras barras. En total 134 barras de este tipo.

B) Barra de 2.44m de longitud, con dos perforaciones en cada extremo unicamente para unirlas a otras barras. Total de 6 barras.

C) Barra de 2.0m de longitud, con 4 perforaciones para los nodos y dos más para unirla a otras barras. En total 4 barras

D) Barra de 1.50m de longitud, con 3 perforaciones para los nodos y dos más para unirla a otras barras. En total 16 barras.

3 Reticula en planta



4 Tipos de corte en barras

Corte tipo "A"



Corte tipo "B"



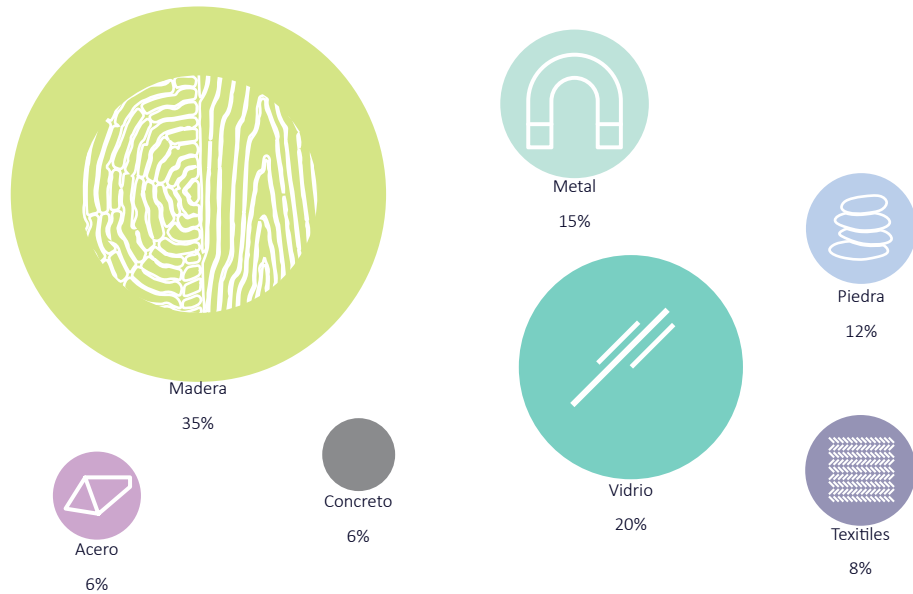
Corte tipo "C"



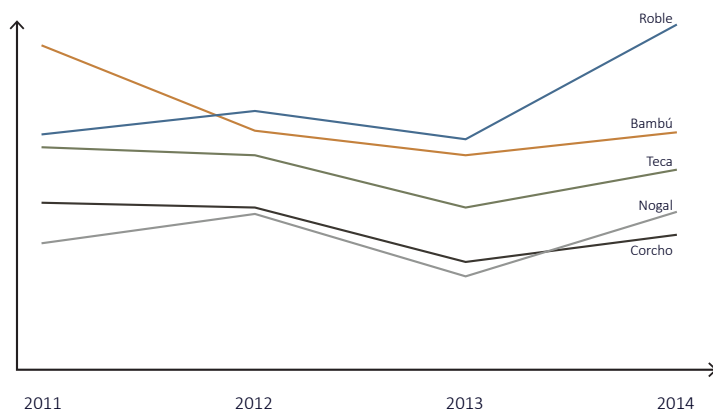
Corte Tipo "D"



5 Búsqueda de materiales en los últimos años:



6 Demanda de tipos de madera



SELECCIÓN DEL MATERIAL

La arquitectura ha sufrido una serie de transformaciones, debido a la creciente comunicación e interdependencia entre los distintos países del mundo, la importancia de estar al corriente de las innovaciones (de materiales, sistemas constructivos, herramientas digitales, entre otras) es esencial en el contexto actual.

El desarrollo de nuevas tecnologías abre un amplio abanico de nuevas posibilidades. La existencia de nuevos materiales y procesos de fabricación digital están ligados a una mayor libertad creativa. Sin embargo la elección de un nuevo material o un proceso de fabricación digital no significan la realización de un proyecto innovador. La importancia de la selección del material radica en la toma de decisiones para el diseño y ejecución de cualquier proyecto.

La madera, uno de los materiales más antiguos utilizados para la construcción y la fabricación, en los últimos años ha vuelto a tomar importancia en el ámbito de la construcción por su gran beneficio ambiental así como su la facilidad para trabajar el material. Un estudio realizado por la página de Internet Architonic¹ coloca a la madera en primer lugar como material usado en el diseño industrial y en la arquitectura en los últimos años. Siendo dentro de las maderas los productos más usados el bambú y el roble.

MADERA DE PINO ^{2, 3} (*pinus oocarpa*)

El pino es una madera suave con propiedades físicas que varían acorde al tipo de pino de que se trate. La madera que se seleccionó para el pabellón fue Pino Amarillo, siendo más duradero y considerado maderas más fuertes. Utilizado generalmente por su solidez y bajo costo.

La capacidad del Pino Amarillo frente al clavado y a otros tipos de conectores metálicos se encuentra entre las más resistentes de todas las coníferas.

La estructura celular del Pino Amarillo facilita la penetración uniforme y en profundidad, en este caso, del agua. Aprovechando la propiedad de higroscopicidad para la generación de la forma a través de deformar la madera. La mayor parte de las especies son poco impregnables

1 [Http://www.architonic.com/ntsht/architonic-trend-analysis-materials/7001094](http://www.architonic.com/ntsht/architonic-trend-analysis-materials/7001094)

[Fecha de consulta: 24 agosto 2015]

2 [Http://www.madex.es/index.php?id=300](http://www.madex.es/index.php?id=300)

[Fecha de consulta: 25 agosto 2015]

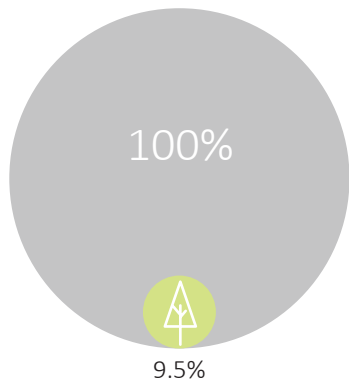
3 [Http://es.wikipedia.org/wiki/Pinus_oocarpa](http://es.wikipedia.org/wiki/Pinus_oocarpa)

[Fecha de consulta: 25 agosto 2015]

7 Mapa de distribución de la madera de pino



8 En 9.5% del territorio mexicano puede desarrollarse la madera de pino.



9 ¿Porqué construir en madera?



y deben ser perforadas o mecanizadas con una serie de pequeñas hendiduras en la superficie de la madera en la dirección de la fibra.

Apariencia

Es un árbol que alcanza un tamaño de 15 a 25 m de altura, con el tronco grueso y la corteza gris o café-rojiza. Las hojas son de color verde olivo o verde pasto, y miden de 12 a 30 cm de largo. Tiene conos solitarios o en dos que se abren al madurar como rosas y son café amarillento con brillo o café rojizo.

Estructura interior

El pino combina un buen nivel de penetración y de retención para los tratamientos. En el pino la albura es impregnable y su duramen lo es parcialmente.

La madera de pino es un recurso abundante

La distribución y hábitat del pino va desde el estado de Chihuahua, hasta Guatemala y a las más altas elevaciones de Honduras, El Salvador y Noroeste de Nicaragua. Habita entre los 900 y 2400 m sobre el nivel del mar. Su distribución natural está entre los 29° y los 14° latitud Norte. Necesita de 15 a 24° C para un buen desarrollo. Las necesidades de lluvia oscilan entre los 1000-1900 mm al año.

La madera de pino es fácilmente transformable y procesable

Se trata de una madera semi pesada, poco nerviosa (fibra recta), semi dura, la cual es apta para el chapado y cuyo mecanizado es fácil en todos los aspectos (cepillado, torneado, moldurado, taladrado, etc.). El encolado es apto, se puede clavar y atornillar con facilidad. Se combina sin dificultad con piezas metálicas de conexión. Además es una madera de color claro.

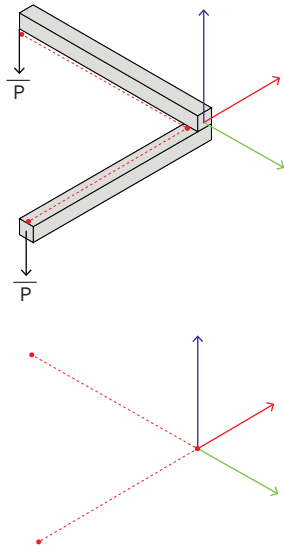
La madera de pino ofrece buenos niveles de resistencia mecánica

Densidad, dureza, contracción, flexión, elasticidad/flexibilidad son las características contempladas para elegir una madera.

El pino no destaca en una de ellas pero, globalmente, es la madera que proporciona la mejor combinación.

10 Diagrama de elasticidad¹

A pesar de la deformación el material regresa a su forma original



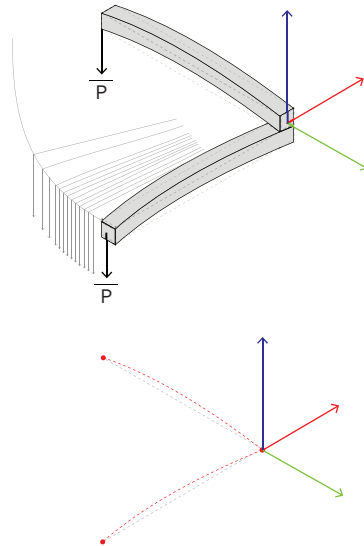
1 Timber Grid Shells: Numerical simulation, design and construction of a full scale structure. B. D'Amico, A. Kermani, H. Zhang, A. Pugnale, S. Colabella, S. Pone

12 Ejemplo de curva tensión-deformación para un esfuerzo uniaxial de tracción. El comportamiento es elástico lineal para pequeñas deformaciones (tramo recto de color azul) y presenta plasticidad a partir de cierto límite.¹

1 www.wikipedia.com

11 Plasticidad

Una vez pasando el límite elástico el material no regresa a su forma original pero no hay ruptura



Elasticidad¹

Capacidad de un material o elemento constructivo de contraerse, dilatarse, deformarse bajo un determinado esfuerzo (compresión, tracción, flexión, entre otros) y **recuperar su forma y su volumen primitivo cuando cesa esta acción.**

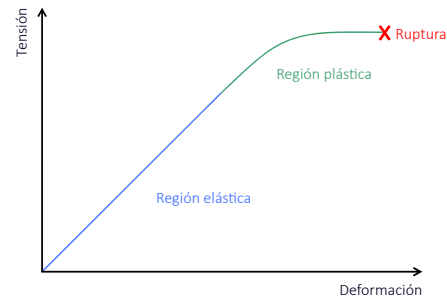
Plasticidad²

Capacidad de un material o elemento constructivo de contraerse, dilatarse, deformarse bajo un determinado esfuerzo (compresión, tracción, flexión, entre otros) y **conservar indefinidamente esta deformación cuando cesa la acción que lo ha provocado.**

Por ello los materiales se pueden clasificar, de forma simplista, en materiales elásticos, plásticos o elastoplásticos. Según su comportamiento ante tensiones normales de trabajo será elástico o plástico, o elástico en una primera fase y plástico después.

Higroscopicidad³

La higroscopicidad es la capacidad de los materiales para absorber la humedad atmosférica. Para cada sustancia existe una humedad que se llama de equilibrio, es decir, un contenido de humedad tal de la atmósfera a la cual el material ni capta ni libera humedad al ambiente. Si la humedad ambiente es menor que este valor de equilibrio, el material se secará, si la humedad ambiente es mayor, se humedecerá.



1 Sastre Ramón, Muños Salinas Francisco, "Propiedades de los materiales y elementos de construcción", Noviembre 2010.

2 Idem.

3 www.wikipedia.com [Fecha de consulta: 30 agosto 2015]

RETÍCULA Y BARRAS

El pabellón en planta forma una malla uniforme con una sola geometría, cuadrangular de 40 x 40 cm, que se comporta de manera cinemática, esto es al cambiar los ángulos de la figura con la que está construida la malla, la distancia entre los nodos siempre es la misma.

La elección de la geometría estuvo determinada por el entendimiento de los casos de estudio anteriormente estudiados, al no tener experiencia en la construcción de Grid Shells, algunas decisiones estuvieron basadas en el análisis de los proyectos construidos.

Con el objetivo de entender y asociar las propiedades del material con la generación de la forma el material elegido fue la madera, y en específico la madera de pino por su economía. Las barras de madera de pino tuvieron una dimensión de 2 x 4 cm de ancho por el largo máximo de 2.40m.

Para el armado de la retícula se tomaron en cuenta la dirección de las fibras de la madera, así como los defectos que presentaban cada una de éstas barras, tratando de evitar las fallas en el conjunto.

UNIONES ENTRE BARRAS

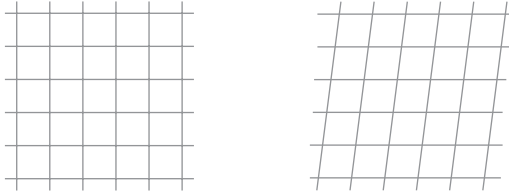
El tipo de unión estuvo condicionado por el tiempo disponible para montar el pabellón. Los tiempos con los que contábamos era una semana para el diseño y montaje, por lo que se tenía que optimizar cada proceso para hacerlo más eficiente.

Cada barra de madera disponible para nosotros tenía una longitud máxima de 2.40m, la barra continua más larga era de XXX por lo tanto se necesitaban dos o mas barras que trabajaran como una sola. Por el tipo de herramientas y tiempo disponible se optó por unir en los extremos las barras con dos tornillos de 1/4", uno de los detalles a cuidar durante el montaje era intercalar la unión de éstas barras para evitar que creciera en escalera.

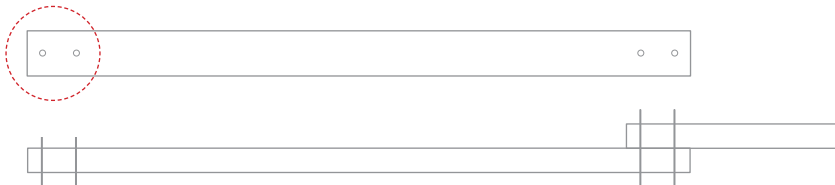
Una vez decidida la ubicación de los tornillos se utilizó una barra como plantilla para hacer ambas perforaciones y poder controlar su ubicación.

Los tramos que se necesitaban menores a 2.40m se distribuía en los extremos la longitud faltante para que en todos los puntos de la retícula fuera completamente simétrico.

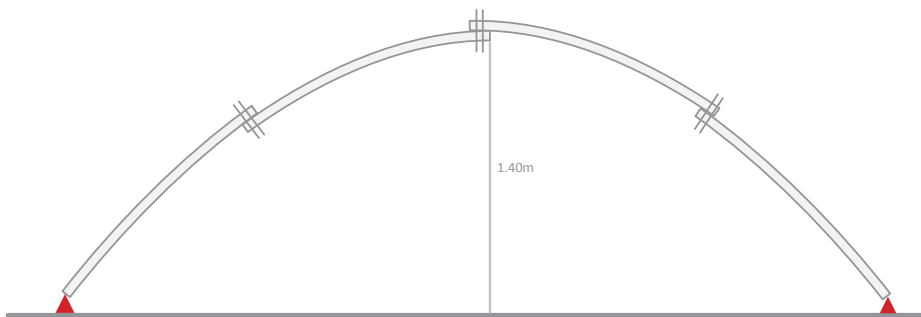
- 13 Retícula cuadrangular, de comportamiento cinemático, es deformada en paralelogramos



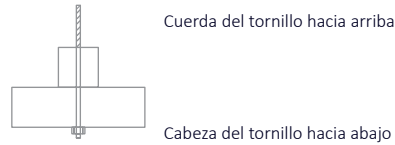
- 14 Las barras fueron perforadas en los extremos con dos tornillos para unir las barras en los extremos



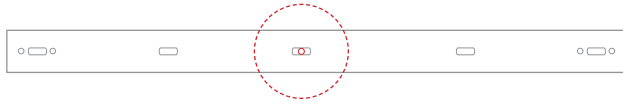
- 15 Ej. de una barra formada por 4 secciones de 2.50, sin ser mojada, logra una altura de 1.40 m



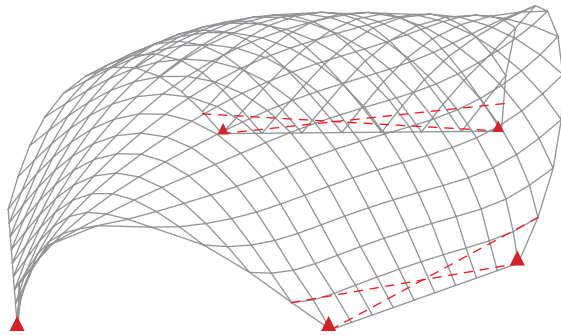
- 16 Tipo de nodo para unión con tornillo y tuerca.



- 17 La perforación de las barras para el tornillo se hacía más grande en el sentido longitudinal para permitir la deformación.



- 18 Refuerzo en los extremos fijados al piso.



NODO

El nodo estuvo formado por tornillos de 5" pulgadas de largo con rondanas en ambos extremos y su respectiva tuerca.

Sobre la barra se realizaba la perforación más grande, en el sentido longitudinal, que del ancho del tornillo para permitir el movimiento durante el montaje y evitar la ruptura de las barras. Todas las cabezas de los tornillos van hacia el interior del pabellón y la cuerda va hacia el exterior para evitar accidentes y generar una estética visual en el conjunto.

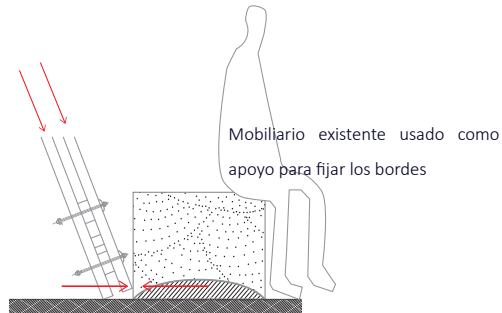
De la misma manera que en la unión de las barras se generó una plantilla para generar todas las perforaciones, posteriormente éstas eran lijadas para evitar que la cuerda del tornillo se dañara.

DIAGONALES

La rigidez del pabellón está dada por la geometría del mismo, siendo estructuralmente estable. Al tratarse de un pabellón experimental y temporal se decidió prescindir de las diagonales en la curvatura de la forma y colocarlos únicamente en la parte baja del pabellón cerca de dónde estarán los apoyos para mantener la forma durante el montaje.

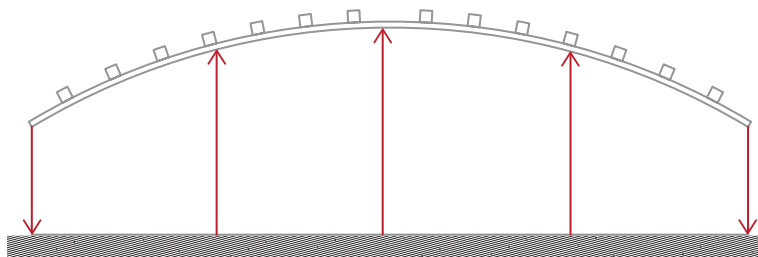
19

Con el objetivo de dejar la mínima huella en sitio se utilizó el mobiliario existente para que el pabellón mantuviera su forma



20

Refuerzo en los extremos fijados al piso.



FIJACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Al ser una geometría de doble curvatura las cargas a las que es sometido el pabellón son optimizadas gracias a su forma, siendo todas éstas dirigidas hacia el suelo.

Una condicionante de la elección del sitio dentro de la Universidad era que la construcción del pabellón tuviera la menor huella al momento de ser desmontado, es por eso que se aprovechó el mobiliario existente como apoyos.

El sitio cuenta con una serie de módulos para sentarse que pueden ser re-ubicados, cada pieza tiene un peso de alrededor de 200kg, por lo tanto el pabellón no requirió de algún apoyo extra. Por el peso del mobiliario con un sólo módulo en cada apoyo hubiera sido suficiente sin embargo por seguridad se colocaron 3 módulos por apoyo.

ESTRATEGIAS DE MONTAJE

Antes de cualquier deformación de la madera es importante saturarla de agua, gracias a la higroscopicidad este proceso puede repetirse teniendo como limitante el momento de ruptura. Una vez saturada se colocaron apoyos puntuales para levantar la Grid Shell; el resto de la estructura tenderá, por peso y efecto de la gravedad, a bajar hacia el suelo.

Los elementos verticales que se colocaron fueron barras de triplay de diferentes alturas, sustituidas diariamente por barras de mayor altura, con una diferencia entre 60cm y metro de altura.

Este proceso se repitió una vez al día hasta lograr la altura deseada. Es conveniente realizarlo de manera paulatina para evitar que las barras se rompan. La dirección de las fibras, la calidad de la madera, la cantidad de nudos influyen en la resistencia de cada barra.

DESARROLLO DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN

El interés, esfuerzo y paciencia de todos los alumnos, así como el de sus profesores, fue el motivo principal para que el pabellón lográra construirse.

El proceso de construcción fue completamente empírico. La ventaja que tuvo realizar el pabellón fue poner en práctica toda la investigación desarrollada. La observación y comparación de los procesos de montaje de distintos pabellones realizados en distintas universidades nos llevó a establecer un sistema para su construcción.

Primero se identificaron la cantidad de barras necesarias y el tipo de perforación que éstas debían llevar. Se dividió el grupo en cuatro equipos de montaje.

El primero debía perforar todas las barras necesarias, el segundo debía lijar las perforaciones para evitar daños en la cuerda del tornillo, el siguiente equipo armaba el largo de las barras y el último equipo montaba la estructura en planta.

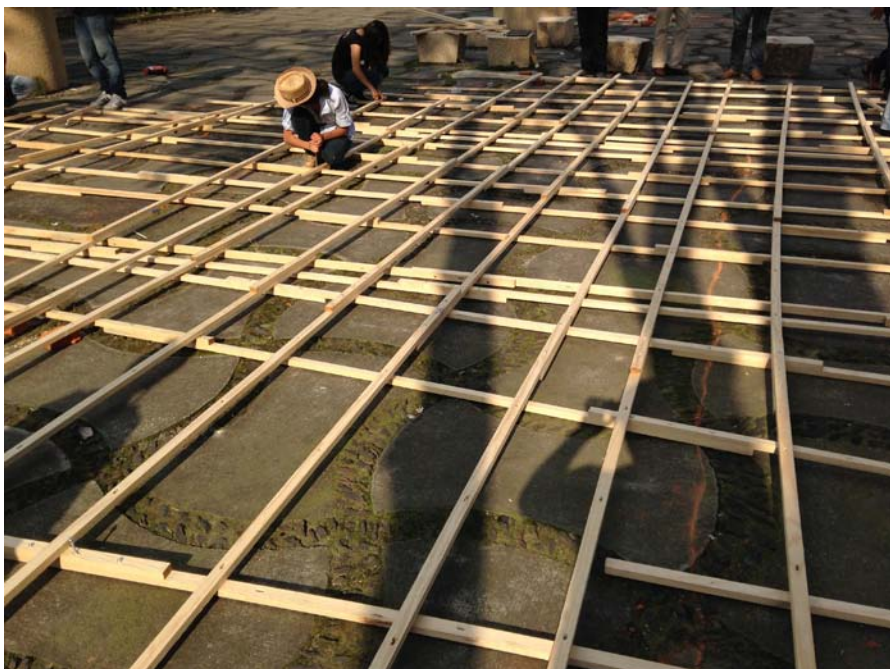
Los primeros días fueron los de mayor trabajo, los estudiantes debían comprender el comportamiento del material, la relación de éste con la forma y todos los esfuerzos que presentan las estructuras de doble curvatura; que todo el proceso de fabricación fuera manual (pudiendo optimizar los tiempos con la fabricación digital) ayudó a que los estudiantes estuvieran más involucrados, y relacionaran la teoría con la práctica.

Una vez teniendo toda la estructura armada en planta, las siguientes actividades eran más sencillas, se mojaban todas las barras con la mayor cantidad de agua; actividad que tomaba alrededor de una hora, debido a la distancia a la que se encontraba la toma de agua. Una vez mojada la estructura se levantaba y se colocaban postes para empezar a deformar las barras. Con la fuerza de gravedad y el peso del material se esperaba que por sí misma tomara la forma final de acuerdo a la simulación.

Cuando la estructura se acercaba a la forma final de la simulación se colocaron los apoyos que evitarían que regresara a la forma original plana. Debido a la elección del tipo de montaje se tuvieron que colocar pesos adicionales en las barras que estaban en contacto con el suelo para poder lograr esa condición.

La ruptura de barras fue inevitable, simplemente se trató de entender el comportamiento del material para lograr que fueran las menos posibles.





DÍA 01 y 02

Después de las clases teóricas se comenzó el proceso de armado, se eligió la madera de pino y se cortaron en secciones de 4 x2 cm por el largo de la tabla.

Se comenzaron las perforaciones en cada barra, lijando cada una, y se armó la estructura en planta. Una vez completamente armada se trataba de mantenerla en constante humedad.

Se realizaron pruebas preliminares y se observó que donde se tenía mayor probabilidad de ruptura era en la perforación más grande.



DÍA 03

Al final del día dos se trató de realizar una primer deformación, sin embargo se fracturaron varias piezas las cuales tuvieron que ser remplazadas.

Se mojó todo la estructura, en los nodos se trato de mantener paños húmedos donde podría haber ruptura y se levantó una altura de 1.20m.

Para evitar futuras fracturas se decidió levantar la estuctura una vez al día, la altura que se levanta cada día dependería de la cantidad de agua que fue absorbida por el material.



DÍA 04

El cuarto día se mojó por completo la estructura y se reemplazaron los apoyos de 1.20m por apoyos con una altura de 1.50m.

Se comenzó a trabajar en la base de la estructura para que pudiera ser capaz de autoportarse. En los puntos donde los límites no llegaban al piso se colocó peso para forzar estos puntos a tocar el suelo.



DÍA 05

La estructura tenía prácticamente su altura final, sin embargo se conservaba un apoyo para esperar que la madera seicara y conservara su deformación.

Se colocaron cinchos donde la madera comenzó a quebrarse, los apoyos al ser puntuales y cargados sobre un nodo comenzaron a fracturar la estructura, incluso se deformaron barras por separada y se remplazaron por aquellas que se encontraban muy fracturadas.



DÍA 06

Después de una semana de contante trabajo la estructura logra su altura final, en el punto más alto de 2.40m.

Se retiraron todos los apoyos y se logró que los límites de la estructura bajaran al suelo, contenidos por el mobiliario existente.

Se realizó una prueba a la estructura con uno de los alumnos colgándose de ésta, sin sufrir ninguna ruptura.



PABELLÓN EXPERIMENTAL

| | | | |
|--------------------|--|-------------------------|--|
| Diseño y Asesoría: | Paola Tovar Yoshio Fukumori | M2: | 50 m ² |
| Lugar: | Ciudad Universitaria Facultad de Arq. | Dimensiones: | 11 m largo, 7 m ancho 4 m altura |
| Año: | 2013 | Tiempo de Construcción: | 7 días |
| | | Material: | Listones de madera |

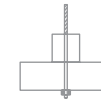
Estructura Temporal. El pabellón experimental no sólo busca demostrar los beneficios de usar herramientas digitales en el proceso de diseño, sino también muestra la aplicabilidad de la madera como material de construcción renovable en la generación de formas geométricas de gran complejidad.

CUBIERTA:



No existe cubierta.

NODO:



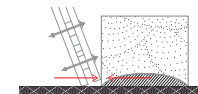
En los nodos se usaron tornillos y rondanas de acero que perforan todas las barras de la retícula.

BARRAS:



Una sola capa de barras de 2cm x 4cm de ancho, con la sección mas larga era de 2.40m.

CIMENTACIÓN:



Al ser una superficie de doble curvatura, tiende a auto soportarse, por lo tanto los límites de la estructura simplemente son eran las bancas existentes en sitio.



PROBLEMÁTICAS DURANTE EL PROCESO DE MONTAJE

Hacer todo el proceso manual trajo consigo errores como movimiento de la plantilla al momento de realizar las perforaciones, que éstas fueran más grandes o chicas, que la madera tuviera fracturas por la vibración del taladro y el peso que se le ponía a las barras para evitar que éstas se movieran.

La gran preocupación durante la construcción fue el montaje. Las simulaciones nos ayudaron a entender la forma que tomaría la estructura, sin embargo cómo se tenía que formar fue totalmente empírico.

Sin experiencia previa de ninguno de nosotros nadie sabía cómo debía ser el montaje, el primer error fue tratar de deformar toda la estructura a la altura final en el primer día. Al forzar la estructura, llevándola al límite, rompimos algunas barras y tuvimos que remplazarlas, lo que ocasionó que se bajara la estructura en su forma original.

Una vez remplazadas las barras se decidió deformar la madera de manera gradual. Se levantaba la estructura cada día aproximadamente entre 50 y 80cm. El problema fue nuestra elección de cómo levantar la estructura, se decidió colocar elementos puntuales que levantarán la estructura lo que ocasionó que hubiera flexión en ese punto, en algunos casos llevando las barras a la ruptura cuando ya se tenía una altura considerable (entre 1.20 y 1.70m), haciendo muy complicado el poder remplazarlas.

Las que no llegaron a la ruptura se dejaron en su lugar y las que se rompieron debían ser sustituidas; primero se tenía que deformar la barra de manera aislada para después colocarla en sitio. La ventaja del comportamiento de las Grid Shells es que cada barra funciona como un arco, por lo tanto las barras se deforman de manera muy similar.

Otro problema que tuvimos fue que hacer el proceso tan gradual, lo que ocasionó que la madera se mojara demasiadas veces provocando que las barras empezaran a tener mayor humedad de la que debían. Para evitar que la sección de la barra aumentara se colocaron cinchos en las zonas más vulnerables para evitar fracturas.

Si se volviera a tener la posibilidad de realizar un pabellón similar haríamos muchas cosas de manera diferente. La Grid Shell que se construyó tiene cierta imperfección que la hace más honesta. El próximo pabellón que nos tocara construir demandaría mayor esfuerzo para lograr mejor nivel de detalle, estableciendo una serie de criterios para evitar fracturas en las barras, y agilizar el tiempo de construcción y montaje.

APLICACIONES EN ARQUITECTURA

El uso que generalmente tienen las Grid Shells es de pabellón, sin embargo la poca explotación del sistema constructivo la ha condicionado a resolver problemas de resguardo de manera temporal.

En el pasado se cuestionaba la durabilidad, estabilidad y calidad de la madera para la construcción, sin embargo el desarrollo de tratamientos al material ha hecho, incluso en ocasiones, aumentar el comportamiento de la madera.¹ La aceptación del material es de gran importancia para el florecimiento del tema.

El desarrollo de nuevos materiales, sin deformaciones permanentes como la madera, han fomentado el re uso de este tipo de estructuras, adaptándose fácilmente a otros sitios.

La relación entre tiempo y metros cuadrados construidos la hacen apta para todo tipo de circunstancias, dentro de las que destacan:

Refugio en situaciones de desastre.

La capacidad de construirse con cualquier tipo de material (tubos de cartón, varilla, acero, entre otros) haciendo posible cubrir una gran superficie con el menor costo posible, promoviendo la participación de la comunidad en el proceso de construcción.

Capilla.

Las características del interior, ser la estructura muro y techo a la vez crea continuidad en el espacio con un patrón constante, generando una sensación de serenidad y reflexión para los fieles.

Pabellón para exposiciones.

Sistemas modulares permiten la rápida puesta en obra y su notable ligereza como estructura la hacen apta para espacios multifuncionales.

Las Grid Shells son referente de diseño único e innovador para la solución de múltiples problemas arquitectónicos.

1

Hernández Hernández Agustín (2012), La madera en la arquitectura del siglo XX.



L - TORNEO INTERNACIONAL DE AJEDREZ, CIUDAD UNIVERSITARIA, D.F.



M - REFUGIO TEMPORAL PARA HABITANTES DE NEPAL



S - PABELLÓN PARA LA PROMOCIÓN DE ARTE Y CULTURA EN
LA PLAZA JESÚS REYES HEROLES, D.F.



CONCLUSIÓN

Desde la selección del sitio, elaboración de maquetas, hasta la construcción misma del pabellón ayudó a comprobar toda la investigación realizada. La comprensión del comportamiento del material fue la base para la toma de decisiones durante el proceso de diseño y montaje.

El estudio de ejemplos construidos similares fue fundamental para evitar más problemas de los que se tuvieron en el momento de su montaje.

Fue una experiencia sumamente enriquecedora no sólo para ésta tesis, sino también para todos los alumnos involucrados, y un ejemplo construido de las posibilidades del uso de herramientas digitales en el proceso de diseño.

Para la facultad y para los que estuvieron directa o indirectamente en este proyecto fue evidencia de la necesidad de involucrar las asignaturas, en éste caso construcción, con un ejercicio práctico ofreciendo un enfoque experimental y experiencia en la innovación y técnica en los proyectos arquitectónicos.

CAPÍTULO

05

CONCLUSIONES Y REFLEXIONES

CONCLUSIONES Y REFLEXIONES

La edificación de estructuras ligeras y la interacción entre construcción y materialidad está muy ligada a la demostración de conocimientos técnicos así como a sus cualidades estéticas. Aunque la arquitectura y la ingeniería tienen diferentes áreas de conocimiento, la mayoría de los grandes proyectos recientes son el fruto de una verdadera articulación intelectual y conceptual entre estos dos ámbitos.

La divulgación e interés de distintos arquitectos en seguir experimentado en el tema inició con las publicaciones realizadas por Frei Otto y su equipo del Instituto de Estructuras Ligeras, pero sobretodo con la construcción de distintas Grid Shells. Demostrando la rapidez de montaje la libertad de forma, los grandes claros que se pueden lograr y el potencial estético.

De no haber sido por el intercambio, las ganas del profesor Le Roy, la disposición de Natalia Kotelnikova de compartirme su conocimiento para juntas encontrar un tema que a ambas nos interesara nada hubiera sido posible, definitivamente me habría tomado más tiempo descubrir éstos temas. Falta impulsar equipos multidisciplinarios dispuestos a sumar esfuerzos para el desarrollo de investigaciones que involucren tecnología, innovación y construcción.

La relevancia del tema en la actualidad es demostrar las múltiples posibilidades de forma desarrolladas a través de un proceso de diseño lógico, creando infinitas posibilidades de experimentación.

Para poder desarrollar ésta tesis al inicio fue difícil encontrar información que me ayudara a comprender del tema, encontrada esta información sentí que la barrera del lenguaje hizo que ciertos términos fueran difíciles de comprender e incluso traducir, empezando por el mismo tema de estudio "Grid Shells". Pero lo cierto es que desde el inicio de ésta investigación en 2011 a la fecha la información se ha hecho más accesible, multiplicado el número de investigaciones, construido más pabellones, haciendo del tema de gran relevancia.

A partir de la investigación se encontraron ejemplos de todo tipo de escala, escuelas apostando por nuevos procesos de diseño y construcción, la aceptación de los avances tecnológicos. El uso de herramientas digitales se vuelve fundamental como retroalimentación de manera inmediata y comprobación de la estabilidad del objeto arquitectónico.

La construcción del pabellón simboliza el resultado del esfuerzo del trabajo en equipo, un acuerdo entre estudiantes y profesores de promover una visión diferente de cómo abordar un proyecto arquitectónico, no sólo conceptualmente, impulsando el uso de herramientas digitales, también en la técnica de construcción.

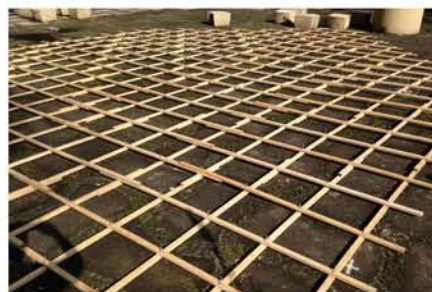
Es importante resaltar que la tendencia de los temas de tesis es la realización de un proyecto arquitectónico a nivel ejecutivo; la tesis, como última experiencia académica, debe fomentar la experimentación, la relación entre lo teórico y lo práctico, debiendo involucrar no sólo arquitectos sino también otras disciplinas y organizaciones que estén interesadas en desarrollar éste tipo de temas.

CAPÍTULO

06

ANEXOS

REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL PROCESO DE MONTAJE



REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL PROCESO DE MONTAJE



GLOSARIO

FORMA.

Configuración externa de algo.

FUERZA.

Capacidad para soportar un peso o resistir un empuje.

MATERIA.

Propiedades y capacidades de los materiales.

ESTRUCTURA LIGERA.

Estructuras de membrana textil, cascarones, neumáticas y de cable que en la búsqueda de la forma llegan a una superficie en equilibrio con el mínimo de material, tomando en cuenta para su fabricación las características de los materiales con los que serán construidos.

GRID SHELL.

Las Grid Shells son estructuras muy similares a los cascarones, su relación está en la geometría y en el comportamiento estructural, sólo se generan fuerzas de tensión o compresión. Siempre inicia con una estructura completamente plana y reticular. Las superficies que no comiencen con una superficie completamente plana para después generar su curvatura al ser deformada se le considera únicamente superficies reticuladas.

DOBLE CURVATURA.

Son superficies generadas por el movimiento de una generatriz (g) curva. Estas superficies no contienen líneas rectas y por lo tanto no son desarrollables. Entre ellas son muy conocidas las cuadráticas, las cuales son superficies generadas por la rotación de una curva cónica alrededor de uno de sus ejes. E.g. esfera, elipsoide, paraboloides, hiperboloides.

AUTOSOPORTANTE.

Aquellas geometrías capaces de soportar el peso propio y los esfuerzos a los que son sometidas.

FORMA ESTABLECIDA.

El resultado final es conceptual, cerebral; las fuerzas que influyen sobre la figura son racionalizadas, y las propiedades del material generalmente no son tomadas en cuenta.

BÚSQUEDA DE LA FORMA.

Es la elaboración de un modelo (analógico o virtual) que va siendo modificado hasta encontrar su punto de equilibrio en el sistema. Es un método experimental donde se busca entender la interacción entre las fuerzas y el material.

MODELO ANALÓGICO.

Es una representación material de un objeto o un proceso para entender mejor su origen, formación o funcionamiento. Es usado para validar hipótesis y aproximaciones que forman un modelo conceptual de cierto proceso u objeto mediante el cálculo numérico.

SIMULACIÓN DIGITAL.

Gil Akos define simulación como: informar a un sistema virtual de propiedades físicas (materia), el cuál está puesto bajo presión (fuerzas) para lograr una estructura específica (forma).¹

ANISOTROPÍA.

Es la propiedad general de materia según la cual cualidades como: elasticidad, temperatura, conductividad, varían según la dirección de las fibras de su estructura interna.

HIGROSCOPICIDAD

La capacidad de los materiales para absorber la humedad atmosférica, o a la que es sometido.

ELASTICIDAD.

Es un parámetro que nos indica la capacidad del material para resistir deformaciones, entre más alto sea su valor, más rígida es éste. El módulo de elasticidad es empleado en el diseño para predecir y controlar las deformaciones.

PLASTICIDAD.

La plasticidad es la propiedad que hace que un material pueda deformarse fácilmente y de forma permanente, aplicando fuerzas de poca intensidad.

1

Akos, Gil (2012), Form, Force, Matter, Pratt Institute, Undergraduate + Graduate Architecture Program

REFERENCIAS DE IMÁGENES

Página 18

01 www.archdaily.com
 ©paristeampunk.canalblog.com

02 <http://www.tumblr.com/search/felix%20candelas>

Página 28

3a-b Frei Otto, Bodo Rasch: Finding form (2006), Menges, Axel.

4a Frei Otto, Bodo Rasch: Finding form (2006), Menges, Axel.

4b matsysdesign.com

5a-b Frei Otto, Bodo Rasch: Finding form (2006), Menges, Axel.

Página 29

6a wewanttorearn.com

6b sandworks.org

7a-b Frei Otto, Bodo Rasch: Finding form (2006), Menges, Axel.

8a DesignTopic: Thinnes Initial Branching Research

8b quantum-air.com

Página 42

09 www.wikipedia.com
 10-11 ladowntowndevelopment.com

Página 66

12 www.cmmkm.com
 13 carpenteroakandwoodland.com
 14 www.pinterest.com/gridshell

Página 67

15 www.cullinastudio.com
 16 www.gridshell.it
 17 <http://inhabitat.com/savill-buildings-curved-locally-sourced-wood-roof-resembles-a-giant-fallen-leaf/the-savill-building-glenn-howells-7/>

Página 75

1-3 www.pritzkerprize.com
 4-5 www.smdarq.net/case-study-mannheim-multihalle/

Páginas 76-77

1 www.wikipedia.com

Página 79

1 www.archdaily.com
 2 www.shigerubanarchitects.com
 3-5 www.detail-online.com

Páginas 80-81

1 www.detail-online.com

Página 83

1-5 www.cullinastudio.com

Páginas 84-85

1 www.pallant.org.uk

Página 87

1 www.archilovers.com
 2-5 www.gridshell.it

Páginas 88-89

1 www.gridshell.it

Página 91

1-2, 4-5 www.archdaily.com
 3 www.grasshopper3d.com

Página 92-93

1 www.archdaily.com

Página 95

1 www.matsysdesign.com
 2-4 www.arch.rpi.edu
 5 TULANE ARCHITECTURE WEEK

Página 96-97

1 matsysdesign.com

Página 133-146

Fotos Yoshio Fukumori/
 Paola Tovar

Página 152-153

<http://coyotitos.com/hotel-majestic-zocalo-ciudad-de-mexico/>

Página 153-154

<http://www.elpoderdelapalabra.com.mx/exegesis-la-unam-ofrece-teatro-musica-antigua-y-moderna-asi-como-muchos-libros/>

Página 155-156

<http://www.portersprogressuk.org/category/nepal-news/>

Página 157-158

Render realizado por Omar Vergara Vargas para Taller de Operaciones Ambientes para el proyecto: Recuperación del espacio público, Plaza Jesús reyes Heróles.

BIBLIOGRAFÍA

-Materiales. Manfred Hegger, Hans Drexler, Matín Zeumer. Ed Gustavo Gili.

-Past and future of Grid Shells, Céline Paoli. Massachusetts Institute Technology.

-Optimisation Structurelle des Grid Shells, Lina Bouhaya, Université Paris-Est, 2010

-Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart: una experiencia de metodología, investigación y sistematización en la búsqueda de la forma resistente, Juan María Songel González, Universidad Politécnica de Valencia, 2005

-Materiales, Forma y Arquitectura, Richard Weston, Ed. Blume, 2008

-Técnica y Arquitectura en la ciudad Contemporánea, Ábalos Iñaki, Herreros Juan, ed. Nerea.

-IL10 Gitterschalen, Frei Otto. Institut für leichte Flächentragwerke, Stuttgart 1974

-IL8 Multihalle Mannheim, Frei Otto. Institut für leichte Flächentragwerke, Stuttgart 1976

-Form Finding: Towards an Architecture of the Minimal, Frei Otto and Bodo Rasch, Edición Axel Menges, 1996.

-Frei Otto estructuras: estudios y trabajos sobre construcción ligera, Roland Conrad. Gustavo Gili, Barcelona 1973

-Cubiertas colgantes, Frei Otto. Versión español por Francisco Folguera. Ed. Labor, Barcelona 1958.

-Form - Kraft - Masse Konstruktion Structures, Frei Otto. Institut für leichte Flächentragwerke, Stuttgart 1979- 1998.

-Arquitectura adaptable: seminario organizado por el Instituto de Estructuras Ligeras, Frei Otto. Gustavo Gili, Barcelona 1979.

-Naturliche Konstruktionen: Formen und Konstruktionen in natur und technik. Prozessen ihrer entstehung, Frei Otto. Institut für leichte Flächentragwerke, Stuttgart.

-The Structure of Vagueness | The Architecture of Continuity, Spuybroek, Lars.

-Innovative Surface Structures: Technology and Applications. Abingdon, Bechthold, Martin. Taylor & Francis, Inglaterra 2008.

-“Structural Design in the Work of Gaudi.” Huerta, Santiago. Architectural Science Review 49.4 (2006): 324-39.

-Computational Design Thinking. Menges, Achim, and Sean Ahlquist. John Wiley & Sons, Inglaterra 2011.

-Inside Smartgeometry: Expanding the Architectural Possibilities of Computational Design. Brady Peters & Terri Peters. AD, Londres 2013.

-Matter: Material Processes in Architectural Production. Borden, Gail Peter., and Michael Meredith. Nueva York, 2011.

-Propiedades de los Materiales y elementos de construcción. Sastre sastre Ramón, Muñoz Salinas Francisco. Edicions UPC, Barcelona, 2010.

FUENTES DE INTERNET

-Grid Shells Tectonics, Mark Cabrinha, www.smartgeometry.org

-Performative Grid Shell by jian + minhawn, www.gridshell.net

-Shigeru Ban Architects, Ban Shigeru, 12 sept 2009, http://www.shigerubanarchitects.com/SBA_WORKS/SBA_PAPER/SBA_Paper_index.htm

-Grasshopper Grid Shell discussion, <http://www.grasshopper3d.com>

-Form resistant weight light structures, www.gridshell.it

-Edward Cullinan Architects, The Downland Museum, www.edwardcullinanarchitects.com

-Parametric Wood, Grid Shells, <http://parametricwood2011.wordpress.com/category/gridshells/>

-Form- Finding of a Grid Shell in composite materials, C. Douthe, O. Baverel, JF. Caron, Institut Navier-- LAMI, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

-Grid Shell experiments, Diploma Studio 10 at Westminster University School of Architecture and the Built Environment, We WANT To Learn <https://wewanttolearn.wordpress.com/2012/08/15/a-year-of-grasshopper-experiments-with-ds10/gridshell/>

-A Design Tool for Timber Grid Shells, M.H. Toussaint, Delft University of Technology Faculty of Civil Engineering and Geosciences Section of Structural and Building Engineering Structural Design Lab, http://homepage.tudelft.nl/p3r3s/MSc_projects/reportToussaint.pdf

-The Geometry of Bending. <http://thegeometryofbending.blogspot.mx/>