

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE ARQUITECTURA**



***GEOMETRÍA Y ESTRUCTURA,  
COMPONENTES DE LA FORMA.***

***MATERIAL DE APOYO PARA ALUMNOS DE ETAPA  
BÁSICA EN LA FACULTAD DE ARQUITECTURA.***

TESINA QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE ARQUITECTO  
PRESENTA:

**ALEJANDRO FLORENTINO HERNÁNDEZ CARRILLO**

SINODALES:

ARQ. OSCAR PORRAS RUÍZ

ARQ. GERMÁN SIERRA LARA

ARQ. OSCAR ALEJANDRO SANTA ANA DUEÑAS

MTRO. EN ARQ. HENRY JOSEPH CABROLIER SANHUEZA

ARQ. ENRIQUE GÁNDARA CABADA



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	4
CAPÍTULO I: INVESTIGACIÓN.....	12
I.I ELEMENTOS DE INTEGRACIÓN AL PROGAMA ACADÉMICO DEL TALLER INTEGRAL I Y II...	12
I.I.1 DIDÁCTICA Y DINÁMICA DE LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES PARA LA INTEGRACIÓN AL TALLER.....	13
I.I.2 OBJETIVOS DE INTEGRACIÓN AL PROGRAMA ACADÉMICO DEL TALLER INTEGRAL:.....	16
I.II MARCO TEÓRICO.....	18
I.II.1 GEOMETRÍA Y ESTRUCTURA.....	277
I.II.2SISTEMAS ESTRUCTURALES.....	35
I.II.3 ESTRUCTURAS DE FORMA ACTIVA Y SUPERFICIE ACTIVA.....	37
I.II.4 FUNDAMENTOS PARA REALIZAR ESTRUCTURAS DE FORMA ACTIVA.....	47
I.II.5 CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE FORMA ACTIVA.....	52
I.II.6 LAS ESTRUCTURAS NEUMÁTICAS.....	52
I.II.6.1 FERROCEMENTO.....	544
I.II.6.1 CASCARONES CON CIMBRA (CASCARONES DE DOBLE Y SIMPLE CURVATURA) ..	57
I.II.7 LÁMINAS PLEGADAS.....	6060
I.II.8 ESTRUCTURAS DE VECTOR ACTIVO.....	65
I.II.9 ARMADURAS PLANAS Y CURVAS.....	688
I.II.10 ESTRUCTURAS ESPACIALES.....	699
I.II.11 ESTRUCTURAS ARBORESCENTES.....	711
I.II.12 ESTRUCTURAS DE SECCIÓN ACTIVA.....	766
CAPÍTULO II: DESARROLLO PRÁCTICO DE LOS EJERCICIOS.....	799
II.1 EJERCICIOS PRÁCTICOS: RESEÑA Y EXPLICACIÓN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS EN EL TALLER EHECATL XXI.....	799
II.3 SUPERFICIE ACTIVA: II.II.2 ESTRUCTURAS LAMINARES, CASCARONES.....	822
II.4 EJECUCIÓN DE UNA ESTRUCTURA PLEGADA.....	900
II.5 DESARROLLO DE UNA ESTRUCTURA DE SUPERFICIE REGLADA.....	944
II.6 DESARROLLO DE UNA ESTRUCTURA DE VECTOR ACTIVO.....	988
II.7 ELABORACION DE ESTRUCTURAS A BASE DE PVC.....	1022
II.8 DE ORIGAMI A PVC.....	1022
II.9 PVC PARA UNA TELA DE MALLA SOMBRA.....	1044

CAPÍTULO III: A MODO DE CONCLUSIONES.....	1066
III.1 CONCLUSIONES GENERALES.....	1066
III.2 APORTACIONES.....	1122
BIBLIOGRAFÍA.....	1144

## INTRODUCCIÓN

Para entender el proceso por el cual se decidió realizar este ejercicio con jóvenes de primer año de la facultad de arquitectura de la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, he de recabar algunas ideas que me llevaron a realizar este trabajo.

En lo personal, darme cuenta de todas las posibilidades y bagaje de conocimientos de tan diferentes áreas, puede ser abrumador y en ocasiones complica mucho la manera de abordar la carrera, tantas áreas en las que se puede desenvolver un arquitecto, es como escoger una carrera dentro de la carrera y por lo tanto cuando tienes que escoger ciertas asignaturas para complementar tu formación se vuelve difícil. Por otra parte, aplicar la metodología como parte de la formación del arquitecto, se complica a mi parecer ya que el último paso que enuncia el maestro Jorge García Olvera es difícil de aplicar de manera contundente: La verificación.

*“El Arquitecto ha logrado preparar su entendimiento práctico y su sensibilidad estética, y ya sabe en*

*síntesis, qué es lo que determina a las fases de su trabajo subsecuente: a la investigación de alternativas diversas de imágenes formales (a modo de hipótesis de solución); a la intuición de la imagen formal que se adecua como solución (a modo de tesis, susceptible a demostración de su verdad), y que ya contiene, desde su concepción intuitiva, el orden (reglas y procedimientos) para la representación gráfica (Diseño), y para la ejecución (construcción), es decir, la última fase que constituye la verificación y que concluye con superar la puesta a prueba de su valor de uso como Objeto Arquitectónico.”<sup>1</sup>*

Después de realizar el primer proyecto arquitectónico y acudir a la obra a las juntas con supervisión y constructora, la retroalimentación se vuelve interesante, ya que se reflexiona las diferentes maneras de abordar un proyecto, las diferentes propuestas que se pudieron haber propuesto siguiendo el mismo programa arquitectónico, sin duda alguna sería una verdadera opción que desde la academia se realice no sólo el

---

<sup>1</sup> García Olvera J. Tabique. Cuaderno de material didáctico. Taller Ehécatl 21, Año 1, N° 2, facultad de arquitectura, UNAM.

proyecto sino también la obra, entonces ¿Cómo llevar a cabo la verificación de la ejecución del proyecto dentro de las condiciones de la academia?

Si bien es cierto que la facultad de arquitectura ha ideado una asignatura que permita aproximarse de varias maneras a condiciones reales, ya sea a un demandante de un proyecto o acceso a edificaciones en proceso, un alumno no se hace cargo de estas responsabilidades, entrega el proyecto sin saber si se ejecutará y aunque se ejecute no se encargará de administrar la obra y resolver las diferentes dudas que pudieran presentar durante la edificación.

Es la misma academia que da la respuesta a esta duda, aunque sea de manera indirecta. Lo que a continuación comprende este trabajo son tres consideraciones: se presenta un análisis rápido de cómo la arquitectura se ha valido de la verificación de lo que a través de la historia se ha edificado y lo que la academia ha llevado a cabo para realizar diferentes análisis de estructuras y ejercicios que permiten

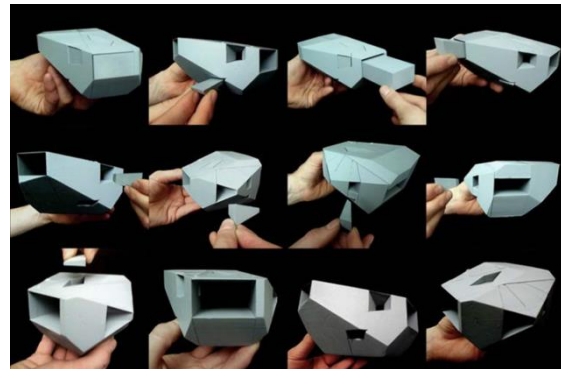
materializar diferentes diseños a pequeña escala como una cubierta o mobiliario, por ejemplo; todo esto se mencionará mientras se explican los diferentes ejercicios que se proporcionaron a los alumnos para realizar un ejercicio muy específico que llevará a los alumnos a concluir una estructura dentro de sus posibilidades e involucrándose en la administración de la mano de obra, materiales y tiempos de edificación.

En los pocos años de experiencia laboral, no hay trabajo que recuerde mejor y que me enseñó bastante como el proyecto que se realizó en la delegación Iztacalco, una casa para el adulto mayor. En ese trabajo pude apreciar la importancia del criterio estructural y su importancia en el proceso del diseño: dominar el dibujo y trazo de detalles no ortogonales, entender el comportamiento estructural y sobre todo, que un objeto arquitectónico no se resuelve con soluciones reaccionarias y de un instante, mucho menos si no hay un programa definido que permita guiar los detalles que en obra suelen aparecer.

Como parte de la observación académica, el estudio de la historia de la arquitectura, pero a través de sus sistemas estructurales y su relación con la geometría me permitió, tiempo después, llevar a cabo una serie de ejercicios que rescaten el manejo de las maquetas como un auxiliar aplicado al diseño, considerando el uso de la geometría y el diseño estructural. Sin importar de las limitaciones en el dominio del cálculo, dibujo asistido por computadora u otras herramientas, con este trabajo se resalta el manejo de las *maquetas de trabajo*, denominado así a las maquetas que presentan la ideas general y volumétrica de nuestro proyecto, hecho con materiales sencillos, de bajo costo y a veces con materiales de reúso, siendo estas aún manejables para explorar posibles propuestas<sup>2</sup>

*“La práctica de crear una amplia selección de maquetas permite a OMA mantener una mayor complejidad en el proceso de diseño. Cuanto más*

*puedan retrasar la toma de decisiones finales, más posibilidades habrá de que una gran idea surja. Cada maqueta refleja el estudio en su conjunto, una colección de elementos en constante cambio hasta alcanzar el resultado final, ideas inteligentes de cómo el mundo podría ser”<sup>3</sup>*  
**(Ilustración 1).**



**Ilustración 1:** © OMA, 1999, <<Sin título>> Fotografía maquetas OMA. En esta foto se aprecia la exploración formal con una extensa cantidad de posibilidades, ya que no existe la forma definitiva para una propuesta, se respetan algunos parámetros que darán varias opciones que, según el proyectista definirá como la “idónea” o adecuada. <https://oma.eu/projects/casa-da-musica>

Para la selección de la estructura y la forma de nuestro edificio, pasando por alto, al menos hasta esta etapa, el detalle en la maqueta y centrando su desarrollo en la obtención de la forma

<sup>2</sup> García Olvera J. Tabique. Técnicas básicas para la construcción de maquetas. Taller Ehécatl 21, Año 1, N° 7, facultad de arquitectura, UNAM.

<sup>3</sup> Valero Escolano P. J. Cubel F. (Tutor) ANÁLISIS CONSTRUCTIVO DE TRES OBRAS DE OMA/REM KOOLHAS: CASA DA MUSICA, BIBLIOTECA CENTRAL DE SEATTLE Y NEXUS WORLD, Universitat Politècnica De València, 2017 <https://riunet.upv.es/handle/10251/105232>

y la estructura. Definido el programa arquitectónico, este sirve de referente para delinear las diferentes soluciones, las cuales requiere de mucha exploración hasta que la forma sea clara y definida, sin un proceso claro, lo único concreto es que la exploración es necesaria y debe ser basta.

En este trabajo, se muestran los diferentes sistemas estructurales sin pretender profundizar en el cálculo estructural o sus programas afines sino su comportamiento según su análisis formal-estructural que permita experimentar con la geometría, dar soluciones formales sin incursionar en el cálculo. Las estructuras son un mundo, de eso no cabe duda y su dimensionamiento a través del cálculo rige las normas internacionales y locales, pero dentro del trabajo de un arquitecto, primero tiene que familiarizarse con las estructuras y sus diferentes soluciones formales, para así identificar el sistema estructural idóneo que pueda adecuarse a un objeto arquitectónico, sin dejar fuera los fundamentos del diseño y composición.

En el proceso del diseño, existe una etapa inicial que requiere ser atendida mediante el desarrollo de configuraciones tridimensionales, la expresión física de un objeto permite vincular al objeto con la percepción de este.

Aunque no es el objetivo de este trabajo profundizar en los fundamentos del diseño, si se mencionarán diferentes aplicaciones para resolver uno de los principales problemas de la arquitectura: cubrir espacios. En ese sentido, las soluciones que los arquitectos han dado a cada problema que se han enfrentado, pretende no sólo servir como modelo a copiar solamente, sino entender cómo se concibió la forma y además, que es una tradición en la historia de la arquitectura buscar formas, resistencia de las formas y materiales y su edificación. Para ello se presentan los diferentes tipos de estructuras como los clasifica el ingeniero Heino Engels<sup>4</sup> y en lo sucesivo se abordarán las dinámicas para trabajar con maquetas de trabajo de diferentes tipos de estructuras, así

---

<sup>4</sup> Heino Engel. Sistemas de estructuras. Editorial Gustavo Gili s.l. Barcelona, 2006. 1ª edición



como las soluciones en cuanto a los detalles y por último, las condiciones del diseño estructural aplicables al proyecto arquitectónico.

Después de enunciar y explicar los sistemas estructurales en general, explicando su trascendencia estética y estructural, se profundizará acerca de los ejercicios propuestos para los alumnos del primer año en el taller Ehécatl XXI, de la facultad de arquitectura, pues en esta etapa de formación comúnmente se realizan propuestas en cuanto a volumen y estructura, herramientas necesarias pues es una etapa donde los fundamentos del diseño se enseñan a través de la creación de maquetas, los cuales son el medio apropiado para adquirir conocimiento, discernir acerca de la propuesta apropiada y sobre todo apreciar en tres dimensiones las diferentes realidades de un volumen dado por un material o un desarrollo geométrico a trazar.

En la “etapa básica” de la carrera de la facultad de arquitectura, los estudiantes ignoran muchas cosas como el dibujo y por lo tanto el

proceso de aprendizaje ocurre con la elaboración de maquetas de trabajo, donde se exploran y por lo tanto el conocimiento se adquiere de manera tangible, a través de maquetas, una posibilidad que se analizará con ejemplos que se utilizan en otras universidades con ejercicios que se explicarán, siendo esto una alternativa que les permita adquirir práctica para diseñar en tres dimensiones y así aplicar dichos conocimientos en la solución de problemas de diseño, experimentar con su comportamiento, su factibilidad y sobre que el alumno entienda las posibilidades estructurales y formales existentes para cada una de las diferentes propuestas se presenten.

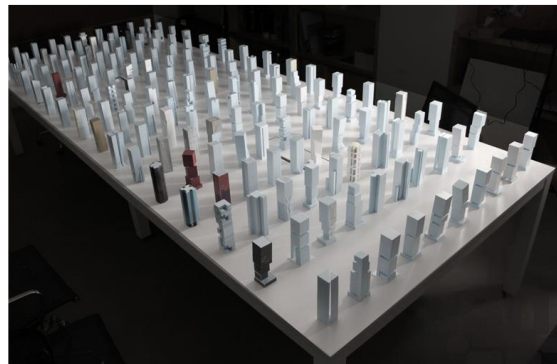
*“El proceso y la comunicación son el núcleo de la actividad de diseño diario, y las maquetas son instrumentos poderosos tanto para hacer como para expresar proyectos. Esta herramienta relativamente nueva ha aumentado su importancia durante el siglo pasado y el actual, tomando direcciones inesperadas. Por un lado, ha seguido corrientes artísticas que cruzan la frontera entre el arte y la arquitectura.*

*Por otro lado, ha sido el campo de pruebas para nuevas experimentaciones formales y tecnológicas.*

*A veces las esculturas, otras veces los productos industriales, no paran de fascinar a los diseñadores y al público. Varias publicaciones y exposiciones se han dedicado a las maquetas, lo que confirma su innegable relevancia en la arquitectura.”<sup>5</sup>*

Los ejercicios que se explicarán se han pensado como un auxiliar para analizar a la par la estructura con la forma y su repercusión en la edificación, porque en el proceso de imaginar y crear se hacen casi inmediatamente, pues así como una idea es fugaz y momentánea en la mente, materializarlo en poco tiempo es fundamental para realizar un juicio entre la idea y la forma sugerida, descartar parcial o totalmente una idea es factible cuando este ejercicio de materializar una idea es dinámico y rápido. A tal grado que se podría optar

por presentarse varias maquetas y realizar juicios de valor propios de cada proyectista para descartar cada una de las propuestas que él mismo ha materializado, como ocurre hasta en los talleres de mayor reconocimiento como el equipo liderado por Herzog & de Meuron **(Ilustración2).**



**Ilustración 2:** © Herzog & DeMeuron, <<Sin título>>, 2001, fotografía de la exploración a través de maquetas de trabajo, donde se exploran las diferentes formas para una propuesta arquitectónica. Se aprecian diferentes opciones para una misma propuesta, es este dinamismo para proponer que resulta útil en la concepción formal. Taller de Herzog & de Meuron [http://archivesma.epfl.ch/2015/091/vocialta\\_enonce/francesca\\_vocialta\\_enonce.pdf/](http://archivesma.epfl.ch/2015/091/vocialta_enonce/francesca_vocialta_enonce.pdf/) Pp. 118.

Cada elemento considerado en el proyecto, como la estructura, función y fundamentos del diseño dan coherencia cuando se toman en cuenta de manera integral, pues la estructura propuesta permitirá cubrir los espacios según el uso evitando sorpresas como incluir refuerzos donde parezcan sobrar o afecten al

---

<sup>5</sup> Model Architecture, Francesca Vocialta, Nicola B., Geers K., Zanderigo A., École Polytechnique Fédérale, de Lausanne, Pp. 5 Trad.: Autor. [http://archivesma.epfl.ch/2015/091/vocialta\\_enonce/francesca\\_vocialta\\_enonce.pdf/](http://archivesma.epfl.ch/2015/091/vocialta_enonce/francesca_vocialta_enonce.pdf/)

uso para lo cual se diseña un espacio, además que la misma estructura enfatiza o resalta los fundamentos de diseño utilizados, es por esto que la estructura seleccionada será útil y por lo tanto será un objeto único e indivisible tanto en componentes de diseño como la estructura.

El objeto arquitectónico (seleccionando estructura y forma paralelamente en el diseño) permitirá diseñar una envolvente y estructura específica, como se verá en cada uno de los tipos de estructuras expuestas en este trabajo podrá notarse que por sí sola la estructura define la forma y en caso de que se tome en segundo término a la estructura se recurren a un limitado número de soluciones formales y estructurales, mientras que la oportuna selección de un sistema estructural ayuda a orientar al diseño en la definición de materiales y formas en específico, como sucede en las obras de arquitectos e ingenieros que se abordarán en este trabajo, donde la estructura es la pieza fundamental en el diseño sin menospreciar los fundamentos del diseño ni la geometría.

Ya sea para una empresa o la obra pública, con relación a la etapa del anteproyecto<sup>6</sup> ya sea por las condiciones de pago o proceso de gestión del proyecto, no se realiza ningún tipo de cálculo como tal debido a que no se ha autorizado su realización por parte del cliente, por lo que es importante recurrir a soluciones factibles que en las posteriores etapas del proyecto (elaboración de proyecto ejecutivo, memorias de cálculo, etc.) no sufran cambios por cuestiones de cálculo. Por ello los arquitectos tenemos que recurrir, ya sea a redimensionamientos o reglas de aproximación para definir peraltes o dimensionar los elementos que componen a las estructuras pues de lo contrario se hace inviable continuar con el anteproyecto, pero para ampliar la gama de posibilidades formales-estructurales se tendrá que trabajar,

---

<sup>6</sup> Según las NORMAS DE CONSTRUCCIÓN DE LA ADMINISTRACIÓN PÚBLICA DE LA CIUDAD DE MÉXICO, un anteproyecto es: "Conjunto de elementos de representación y documentos que proporcionan una idea general y clara de lo que se pretende realizar (planos y croquis), respondiendo a las condiciones planteadas por el programa arquitectónico respectivo, por las características del terreno elegido y por el contexto en el que se ubica". LIBRO 2: SERVICIOS TECNICOS, PARTE 01 PLANEACION Y ANTEPROYECTOS, SECCION 02 ANTEPROYECTOS, CAPITULO 001 GENERALIDADES DE ANTEPROYECTOS. <https://www.obras.cdmx.gob.mx/storage/app/uploads/public/5da/f27/bf9/5daf27bf91744594257562.pdf>

además, con modelos o maquetas que se enfoquen en la estructura y así dar solución no sólo a las cuestiones formales y funcionales sino también estructurales. En el desarrollo del proyecto dentro de la academia tendrá que ser lo mismo y con este trabajo se pretende abordar tales cuestiones, pero enfocadas en la forma, la estructura y la elaboración de sus correspondientes maquetas de trabajo, que permitan acercar al alumno a diferentes soluciones estructurales. Lo que la historia reciente de la arquitectura nos ha mostrado es que existe una gama de soluciones formales para un problema en particular y muchas veces la innovación o la certeza de una forma se debieron a un trabajo previo relacionado con las maquetas y la estructura.

Para citar las estructuras y los ejercicios que elaboraron clasificándolos según el sistema estructural al cual auxilian dichas maquetas, para que así, en el proceso de selección de la forma y la estructura, se entiendan las condicionantes estructurales, en cada

apartado se mencionarán las características formales, ejemplos de obras ejecutadas y los ejercicios relacionados.

Para tales fines se explicarán los diferentes sistemas estructurales, se expondrán también los trabajos que fueron aplicados a los alumnos del primer año de la facultad de arquitectura en el taller Ehecatl 21, así los alumnos observarán las posibilidades en cuanto a la forma que los diferentes sistemas estructurales nos ofrecen; apreciarán los materiales que les permitirán dar un volumen a sus propuestas de manera accesible y manejable, con el propósito de que interpreten estos recursos para aplicarlos en su proceso de diseño, además que las maquetas son una herramienta recurrente y cuando se pretenda analizar de manera global y total al objeto arquitectónico, como lo hicieron varios arquitectos que citaremos más adelante, donde el cálculo y la estructuración son tomadas como dos cosas diferentes y será, entonces la estructuración lo que nos permitirá definir una forma viable sin cálculo la selección de un sistema.

# **CAPÍTULO I: INVESTIGACIÓN**

## **I.1 ELEMENTOS DE INTEGRACIÓN AL PROGRAMA ACADÉMICO DEL TALLER INTEGRAL I Y II**

Los ejercicios aplicados remiten a la idea de anteponer el análisis de la volumetría de las maquetas de trabajo a los procesos computacionales, ya que muchas veces se vuelven rectoras de las soluciones que se ofrece a un objeto arquitectónico y no porque se trate de una solución estructural convencional sino porque se vuelve más fácil de manipular en las paqueterías informáticas. Las corrientes arquitectónicas y sus propuestas se han mantenido al margen de la definición de la estructura pero ha habido casos donde la estructura se vuelve protagonista a la par de la solución formal, compositiva y funcional, por lo que la labor de integrar propuestas estructurales a la par de la composición arquitectónica no es descabellada y al conocer ciertos materiales para la ejecución de maquetas se percibirá mayor facilidad la transición del papel a una imagen en las tres dimensiones. Pues diseñar

del papel en blanco a un plano y de este a un modelo en tres dimensiones es difícil, pero resulta más fácil y natural diseñar el volumen y después plasmar nuestras propuestas en los diferentes planos.

Para abordar y entender el trabajo que se hizo con los alumnos, deberán notarse 3 momentos o estadios:

- El marco teórico: la historia de la arquitectura basada en los sistemas estructurales, abordando cuatro de los cinco tipos de estructuras con los alumnos basada con la clasificación de Heino Engles, la cualidad del planteamiento de este ingeniero y los trabajos que se expondrán en el marco teórico permiten ver la vigencia de esta clasificación y sus propiedades básica. Todo el contenido del marco teórico rescata temas de asignaturas como sistemas estructurales 1, historia de la arquitectura y geometría, lo que le da mayor profundidad a los ejercicios prácticos.

- Ejercicios prácticos para la construcción de una cubierta: Los

trabajos expuestos se abordaron a través de dos actividades principales: Elaboración de maquetas de trabajo y la Selección y elaboración de una estructura. Esta dinámica fundamental es una manera de aproximar a los estudiantes a la confrontación de sus ideas con la realidad en la ejecución de una estructura, confrontarán su propia planeación con los recursos limitados que poseen, exponiendo sus inquietudes con el tipo de estructura seleccionada y los materiales utilizados.

- Conclusiones: Recopilación de observaciones y descripción de las experiencias a las que se sometieron los alumnos para realizar su trabajo enfrentándose según al sistema estructural, procedimiento y la aplicación de recursos para su elaboración.

### **I.I.1 DIDÁCTICA Y DINÁMICA DE LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES PARA LA INTEGRACIÓN AL TALLER**

Para abordar los Ejercicios prácticos para la construcción de una cubierta, se pensó en una estrategia de dos pasos: Elaboración de maquetas y la selección y elaboración de una estructura. Reduciendo al mínimo el programa arquitectónico y pensando solamente en cumplir una sola función con esta cubierta, los alumnos se enfocarán sin problemas a la elaboración y selección de la forma y por consiguiente ejecutar la estructura.

Esta decisión se debe a que estamos hablando de un sistema escolarizado al que no se puede profundizar en otras cuestiones del diseño pues este ejercicio pretende servir como una herramienta más del Taller Integral dando mayor diversidad al proceso de aprendizaje y tomar este ejercicio de converger varios conocimientos propios de la etapa básica de formación dentro de la Facultad de Arquitectura de la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

La dinámica es la siguiente:

1. Elaboración de maquetas de trabajo, como una primera aproximación de los alumnos a la estructura, sin ejercer presión en ellos en cuanto al manejo de cualquier herramienta de diseño como el dibujo técnico o el uso de herramientas como softwares, pues se pretende explorar las formas y después dibujarla, una idealización en cuanto al proceso de diseño. Analizando forma y estructura en su conjunto como un recurso del diseño para el objeto arquitectónico.

2. Selección y elaboración de una estructura: el alumno escogerá y elaborará una estructura para que se entiendan, en definitiva, los riesgos, problemas técnicos y complicaciones que conlleva la construcción de una estructura. En algunos casos se requiere de la elaboración de conexiones y detalles escala 1:10 o 1:20 para aproximarlos al comportamiento de la estructura, a las dificultades técnicas y al detalle.

No hemos mencionado nada sobre un método para el diseño, tampoco cómo y en qué parte del diseño conviene

trabajar con estas propuestas realizadas. La respuesta es que no hay una solución que resulte satisfactoria al respecto, ya que el proceso del diseño, a pesar de que se suponga fundamental para la arquitectura, no hay un método universal al respecto, tan es así que muchos pensarían que la inspiración se presenta en el momento de comenzar a dibujar, hacer maquetas o en el momento de realizar la investigación pero no necesariamente, cada proyectista tiene su propio comportamiento ante el diseño y se podría decir que profundizar en eso nos llevaría a enfocar este trabajo a el proceso del diseño y el resultado final dados por este proceso.

Este análisis está acaparado por los diferentes ejercicios elaborados dentro del Taller Integral y aunque enfocarnos en esto podría fortalecer el taller, este ejercicio pretende darles otra visión de lo que es el diseño. Este ejercicio entonces pretende enfocarse en un ejercicio de diseño simple y la materialización de esta estructura para dar una dimensión más que el alumno pueda apreciar. Si lo ideal es verificar

cada una de nuestras propuestas elaboradas durante toda la carrera, siendo la edificación el proceso claro para

esto, construir una cubierta que ellos mismo han diseñado, complementa la formación dentro del Taller Integral en la etapa básica

Para realizar la propuesta de cualquier estructura, se requiere contar con un acercamiento a estas estructuras, por lo que se ha considerado que el estudiante se aproxime a la elaboración de maquetas que le permitan trabajar con la forma, mientras que, en algún momento, se requerirá que el alumno realice maquetas de mayor escala para así enfrentarlo al problema de la estructura y su verdadero tamaño.

Cualquiera habrá observado que, en una maqueta de trabajo, resulta sencillo mover elementos, pero que en su escala real resultan complicado, siendo parte de la enseñanza acerca de la construcción, el uso de materiales, logística y administración de recursos, como se verá en el apartado dedicado a la ejecución de las diferentes estructuras.

¿Cómo se seleccionaron los sistemas estructurales para? Interés personal. En realidad. Esa es la riqueza de esta propuesta, no tiene límites para su aplicación, pudimos haber abarcado estructuras como las velarías, la mampostería, la ejecución de estructuras arborescentes, pero los alumnos escogieron qué tipos de estructuras pretendían conocer y realizar los ejercicios y es que parte de la formación de la arquitectura, es que cada alumno escoge los temas y asignatura de su interés, es por ello que este trabajo no ofrecerá una lista de estructuras que se podrían abarcar, se hablará entonces de los ejercicios que los alumnos seleccionaron.



## **I.1.2 OBJETIVOS DE INTEGRACIÓN AL PROGRAMA ACADÉMICO DEL TALLER INTEGRAL:**

- Que el alumno adquiriera la apreciación por la forma y su relación en la estabilidad estructural de un objeto arquitectónico y su importancia en la definición del volumen
- Que analice y establezca un juicio acerca del comportamiento de las diferentes estructuras y así seleccionar la que mejor solucione el espacio que se está diseñando.
- Que el alumno experimente a diferentes escalas con las diferentes estructuras para que entienda su comportamiento, habilidad que se adquiere con modelos tangibles antes que sistemas computacionales o la mera observancia en software de modelado

Este trabajo no pretende ser demostrativo de alguna corriente pero si pretende darle el lugar que se merece al diseño que el análisis de la estructura como parte de la composición y la forma, pues desde la antigüedad cada objeto arquitectónico que se estudia o se valora por sus aportes han sido el resultado del

diseño consiente creando una línea ininterrumpida hasta nuestros días de obras arquitectónicas que parecen haber fusionado los principios de Vitruvio, porque una de las bondades de un diseño integral es un diseño coherente entre espacio-materiales-estructura, siendo eficiente el uso del espacio y de la estructura. Es cierto que ningún elemento de la triada vitruviana debe tener preponderancia sobre las demás, estos ejercicios pretenden poner a disponibilidad herramientas que fortalezcan el manejo de las tres dimensiones.

Bajo la idea de que el proceso proyectual es un ciclo, como el habla, la lectura, etc. Entonces debe haber una relación con este ciclo mano-cerebro-mano con la finalidad de que el proceso de diseño debe tener la suficiente velocidad para que la retroalimentación y el análisis del cerebro se vea plasmado en el proyecto ya sea en croquis o en maqueta.

Cuando hablamos o leemos el proceso se da de manera natural, pero en el diseño, mientras se formula un

espacio o solución para algún espacio se requiere de un croquis inmediato, pero con la suficiente calidad para discernir cualidades, ventajas y desventajas de la propuesta en cuestión. Como se comentó con anterioridad, las paqueterías computacionales se vuelven un lastre para el diseño, a menos que se sepa lo que se va a dibujar, diseñar por diseñar en algún programa se vuelve complicado y tedioso, se dedica parte de nuestra energía pensando en comandos o soluciones para moldear nuestro volumen y si nos ha costado tiempo considerable para crear un volumen o un plano, se vuelve mucho más frustrante reiniciar o comenzar otras propuestas.

El primer croquis que te auxilia y te ayuda a dimensionar, explorar la escala, la forma, ubicar al usuario dentro y fuera del objeto diseñado y percibir los elementos visuales sigue siendo fundamental el croquis como auxiliar, un dibujo rápido que te ayude a percibir lo que tu mente está formulando y así valorar la solución que se pretende explorar, precisamente es esta capacidad que

debe permanecer, pues las ideas son fugaces y difíciles de concretar cuando no hay medios que te permitan plasmarlos en el momento, el problema con los medios informáticos es que estás pensando más en los comandos y las limitantes del programa o la dificultad que significaría modelar ciertas formas, sin valorar si tal vez esa solución no es apropiada en el proyecto te tomas varias horas, posiblemente buscando cómo modelarlo en vez de pensar si esa forma responde a tus solicitudes intencionales del proyecto

.  
Al igual que el croquis la maqueta de trabajo es un auxiliar, no sólo de la forma sino también de la estructura. Las propuestas presentadas tienen esa cualidad, de tratarse de estructuras que se pueden construir en poco tiempo enfocándose en la forma y la estructura al mismo tiempo, si el proceso de selección de la forma parece satisfacer nuestras intenciones en el proyecto comenzaremos inmediatamente a recurrir a los demás elementos del detalle. Si no convence o no parece dar solución a lo que se proyecta se deshecha la idea por el

simple hecho de que no parece adaptarse a las intenciones del diseño, anteponiendo el diseño en vez a la dificultad de hacer una maqueta de trabajo.

Quien realiza estas maquetas se percata de la importancia de la forma en su desarrollo constructivo y estructural y prácticamente esto domina el lenguaje de la obra en cuestión. Hay que mencionar también que hay una frase que se usa entre los arquitectos el cual nos recuerda que no es lo mismo constructor y calculista, sin demeritar ningún trabajo, pero una forma no está dada por el cálculo sino por el criterio de la forma y configuración arquitectónica, la cual le da estabilidad y resistencia independientemente de la estructura y muchas veces esta configuración resulta contraproducente dañando a los elementos estructurales.

## **I.II MARCO TEÓRICO**

Los ejemplos que se han considerado para este apartado sirven de referencia ya sea por su trascendencia, no sólo estética sino estructural-constructiva haciendo evidente la capacidad de sus ejecutores para aplicar la geometría y la eficiencia constructiva derivada del “ensayo y error”. Cabe mencionar que la arquitectura registrada en la historia data de más de siete mil años de desde Mesopotamia hasta nuestros días y en ese período el cálculo que se ocupa de manera corriente no tiene más de doscientos años, por lo que hacer esta revisión es necesaria en cuanto a las enseñanzas que la historia nos deja acerca de la aplicación de la geometría y su ejecución estructural y constructiva.

La historia de la arquitectura está marcada por la necesidad de cubrir espacios con el mínimo de material, secciones más esbeltas o reducidas, como una lógica donde mayor ligereza también significa estabilidad, el camino para llegar a formas estables y estructuras resistentes u otros

fenómenos naturales, notamos una tendencia a recurrir a la geometría, la tecnología relacionada a los procesos constructivos, al uso del espacio con el objeto de usar eficientemente los recursos escasos de materiales y mano de obra, los testigos incorruptibles de cada época son la prueba de esa síntesis para cubrir grandes claros con el mínimo de material. Las condicionantes de seguridad.

*“Lo que ha enriquecido al diseño en la historia de la arquitectura es la intrínseca relación entre la forma y la estructura: una iglesia gótica no solo es bella por lo que sus espacios significan y expresan, sino porque su estructura es para su momento la única forma de poder permitir tal espacio, es una expresión que conjuga arte, ciencia y tecnología, coherente con unos materiales y con su momento histórico; de igual forma, la riqueza de la arquitectura está dada por la relación con una técnica constructiva y con una concepción estructural, que en sí misma no es más que una expresión del*

*pensamiento humano, en su momento.”<sup>7</sup>*

Los sistemas estructurales existentes demuestran el avance de una civilización para delimitar espacios, además que el nivel técnico, tecnológico y científico aplicados a la arquitectura dejan huella y hablan por sí solas de la capacidad que se les da a las artes, al urbanismo, al valor que se le adjudica a las actividades humanas con el equipamiento urbano que revelan las cualidades de una civilización para preservar, dignificar o alentar cualquier actividad humana con la arquitectura. A pesar de la dificultad por construir siempre ha habido esfuerzo por aplicar más allá de la resistencia y estabilidad de las estructuras, tal vez porque se requiere de la pintura y la escultura para reforzar la utilidad del espacio: al final la utilidad de cada obra en cada momento histórico es apreciada por su capacidad de sostenerse, de ser útil y de mostrar su belleza.

---

<sup>7</sup> Maury Montenegro M., La esencia del árbol, Punto Aparte, Colombia, 2009. 1ª edición

A continuación, se habla de los diferentes sistemas estructurales pues es indiscutible que las corrientes arquitectónicas se relacionan estrechamente con la aplicación de la tecnología a la estructura que permiten un nuevo lenguaje arquitectónico de permitir proezas espaciales que con otros sistemas estructurales no se le permite (factibilidad). Observemos pues, cada uno de estos sistemas estructurales y sus características a través del tiempo. En el mundo antiguo, los constructores mantuvieron un linaje de estudio de las estructuras transmitidos a sus mediante la práctica, permitiendo que el uso de dichos conceptos clásicos y sus prácticas, continúen siendo vigentes en la actualidad. Uno de los elementos que en la antigüedad causaron tantas complicaciones y se manifestaron en la solución de espacios ocurrió con la aparición del “dintel”, un elemento horizontal simplemente apoyado sobre muros o columnas que no distribuye momentos y por lo tanto, podemos ver en varios ejemplos, como en los templos



**Ilustración 3:** Arriba : © Martos Fornieles M. 2015, Vista exterior de las cámaras reales, Fotografía, [http://www.thamyris.uma.es/Thamyris6/MARTOS\\_FORNIELES.pdf](http://www.thamyris.uma.es/Thamyris6/MARTOS_FORNIELES.pdf). Abajo: © Pivard E., 2004, Luxor Temple, columns, <https://whc.unesco.org/en/documents/108508>. Obsérvese qué tan monumentales son las columnas y los arquitebros son demasiado cortos para soportar el claro, una constante aquella época lo que complicó cubrir los espacios, dándole tanta importancia a la altura para que la escala corresponda a aquellas proporciones.

egipcios de Luxor<sup>8</sup>, columnas a poca distancia entre sí, pues el material ampliamente ocupado en ese entonces, la piedra, no permitía cubrir claros muy amplios, las mismas complicaciones enfrentaron los “alarifes” de la cultura “minoica”, en el

---

<sup>8</sup> Ubicado en la antigua Tebas, cerca del río Nilo a doscientos kilómetros al norte de su desembocadura en el lago Nasser, en Egipto. Construido entre el 1400 y 1000 A.C. por Amenhotep III y Ramsés II

templo de “Cnosos”<sup>9</sup>, básicamente porque estas piezas no soportan la flexión, un par de fuerzas que deforman al dintel o la viga que la piedra es incapaz de absorber. **(Ilustración 3)**

Un problema que existe en la actualidad es garantizar el “empotre” de los elementos que cubren nuestros espacios hacia los apoyos, de lo contrario y si esto no es considerado en el cálculo, cuando no existe la distribución de las fuerzas del dintel hacia los apoyos, el dintel colapsa, sin afectar la estabilidad del muro o la columna.

Para que el dintel funcione con mayor eficiencia, debe ser homogéneo, o sea que este elemento debe ser una sola pieza, lo que dificulta encontrar una materia prima con las dimensiones que se requerían para su manufactura, ya sea en piedra o madera. Esto trae consigo varios problemas de logística: Elaboración de la pieza, traslado y montaje en su posición definitiva. En la

actualidad esto es un trabajo que exige mucho cuidado para piezas prefabricadas, no sólo para evitar accidentes y daños en las piezas, también en los tiempos de ejecución permisibles. Una alternativa para este tipo de elementos estructurales debían ser elementos que se pudieran trasladar con mayor facilidad, que no requieran de materia prima escasa, no sólo por la ubicación de donde se obtienen las materias primas, sino también que dichas alternativas permitan la utilización del total de la materia prima, por las dimensiones mínimas de dichos elementos. Lo que hace de la mampostería una opción viable. Pero construir un dintel a través de varias piezas de mampostería no es útil para la construcción, pues unir varias de estas piezas es un problema mayor a la colocación de un dintel de una pieza, por lo tanto, el enfoque para el uso de la mampostería en las cubiertas debía recurrir a un nuevo enfoque.

Algún constructor se le ocurrió que a un muro de mampostería podría “desfasar” una hilada del plomo que regía al muro; para la siguiente hilada

---

<sup>9</sup> Ubicada al norte de la isla de Creta, a 5 km al sur de la ciudad costera de Heraklion, se encuentra la zona arqueológica datada entre el año 3000 A. C. al 1600 A. C. correspondiente, según se presume, al período minoico,

ocurría lo mismo, si nos imaginamos cuatro muros a plomo delimitando un espacio, una hilada comienza a desfasarse “hacia adentro” y la siguiente hilada se desfasa de la misma manera, poco a poco quedaba menos espacio a cubrir. Para ejemplificar este procedimiento, la historia de la arquitectura presenta estos sistemas de cubrición de espacios, como en la supuesta tumba de Agamenón<sup>10</sup>, donde se observa que para evitar el colapso, se requiere que la cubierta tome la forma inversa a



la deformación causada por las fuerzas que afectan a la cubierta, un principio básico que, poco a poco se analiza y perfecciona, pasando por la tumba de Agamenón y la bóveda

maya como “el arco” en Labná<sup>11</sup>, (**Ilustración 4**) donde cada mampuesto en “saledizo” permiten cubrir diferentes claros según el dominio de este u otros sistemas similares.

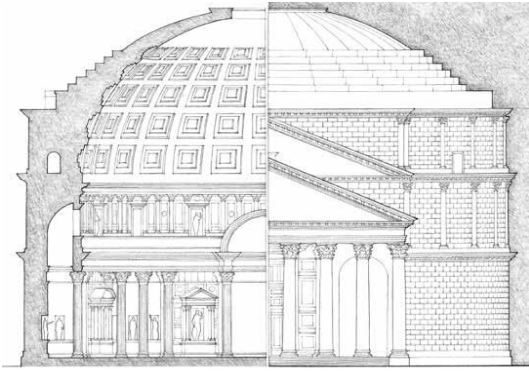
**Ilustración 4:** Izquierda: © Ko Hon Chiu V. Archaeological Sites of Mycenae and Tiryns, 2005, <https://whc.unesco.org/en/list/941/gallery/&index=13&maxrows=12>. Derecha: © Huchim Herrera J., Labná Yucatán, 1991, <https://mediateca.inah.gob.mx/repositorio/islandora/object/guia%3A393>. Ejemplos de bóvedas en saledizo.

En la cúpula del panteón de Agrippa<sup>12</sup> se observa un dominio del material, la forma y la estructura: Así notamos que, para la cúpula del Panteón de Agrippa, se le han incluido los casetones que le proporcionan su ligereza, recurriendo a la reducción del espesor de la cúpula, además de la adición de un óculo o lucernario en la cúpula que permite un espesor mínimo y así mantener su resistencia y la suficiente ligereza para evitar el colapso (**Ilustración 5**).

<sup>11</sup> Labná está en el sudoeste del estado Yucatán al sur de Uxmal aproximadamente a 261 km de Mérida;

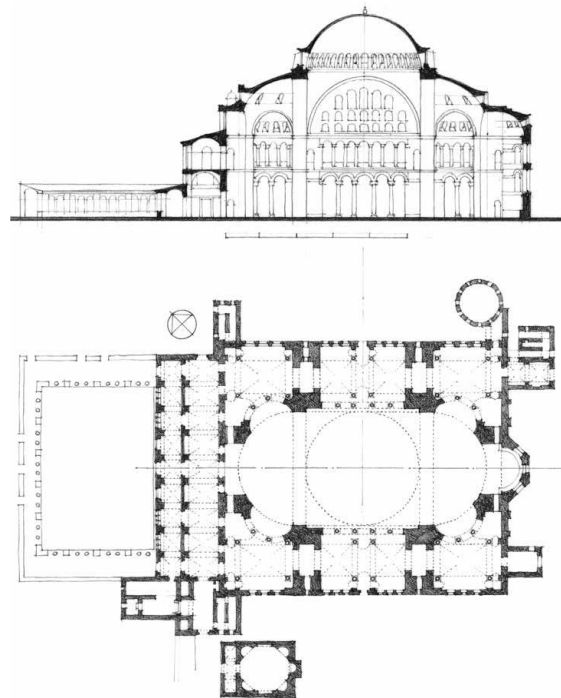
<sup>12</sup> A tres kilómetros hacia el oriente del Vaticano, cruzando el río Tiber, en el corazón de Roma se encuentra la plaza de la Rotonda, el cual debe su nombre esta plaza por albergar el panteón de Agrippa también conocido como la iglesia de Santa María Rotonda.

<sup>10</sup> Se encuentra en la provincia de Argolida, península del Peloponeso, construida en el período micénico supuestamente por Agamenón.



**Ilustración 5:** © D. K. Ching F. El Panteón: sección y alzado, 2007, A global history of architecture<sup>13</sup>. Panteón de Agripa, edificio coronado con una cúpula de 43.30 m, se observan los contrafuertes con las arcadas y el aligeramiento en la cúpula a través de los casetones con esos nervios de ladrillo y el óculo.

Mientras que, en la catedral de santa Sofía en Constantinopla (**Ilustración 6**), se erige una cúpula que juega con el arco de medio punto y una serie de contrafuertes que permiten mostrar mayor ligereza que en el panteón, construyendo alrededor de la cúpula haya una sucesión de arcadas que permiten la entrada de la luz y así mostrar mayor ligereza que en el panteón de Agripa.



**Ilustración 6 :** © D. K. Ching F. Basílica de Santa Sofía, Estambul, Turquía: planta y sección, 2007, A global history of architecture<sup>14</sup>. La iglesia de santa Sofía es otro ejemplo de la ejecución basado en la geometría y de diferentes métodos para garantizar su ligereza como es el caso de la arcada que recibe toda la cúpula, la cual le da ligereza, pero también rigidez, permitiéndole 32.70 metros de diámetro de su cúpula.

Las estructuras responden a un principio presente en la naturaleza, que define a las osamentas aerodinámicas y resistentes, este principio ha sido rescatado por los arquitectos y los ingenieros para lograr mayores claros.

Conocido como el “principio de la economía de la sustancia para el mundo orgánico” se ha aplicado a las estructuras, en el cual consiste en reducir al mínimo la sustancia del

<sup>13</sup> D. K. Ching F., Prakash V., Jarzombek M, Una historia universal de la arquitectura, 2011 Gustavo Gili, Barcelona

<sup>14</sup> Ibid



material de la estructura sin arriesgar la resistencia.

Este principio o al menos su interpretación como un fenómeno existente es mencionado por el erudito Matila C. Ghyka, quien enuncia un comportamiento geométrico y armónico tanto en lo que él denomina mundo orgánico y el mundo mineral, existiendo formas y estructuras que reduzca la masa o sustancia de las estructuras orgánicas o la recurrencia a formas poliédricas para dar estabilidad a las estructuras minerales.

“El estudio, por una parte, de los poliedros regulares y semirregulares, y el de las equiparticiones del espacio, de las agrupaciones de esferas tangentes y de las redes de puntos, por otra, constituye, pues, la armadura de la teoría de los sistemas de simetría sobre la cual se basan la Cristalografía y una buena parte de la Química molecular [...] bajo el nombre de principio de acción estacionaria, como ley dominadora, y relación invariable por excelencia, del universo físico. Es el principio de la mínima acción, cuyo enunciado clásico es el

siguiente: Para pasar en el intervalo de tiempo  $t_1-t_0$ , de un estado a otro, un sistema de cuerpos debe tomar un camino tal que el valor medio de la acción (diferencia entre las energías cinética y potencial del sistema) durante el tiempo considerado, sea lo más pequeño posible”<sup>15</sup>.

Por otra parte, como ya se mencionó, el mundo orgánico se rige por el principio de la economía de la sustancia, pues los compuestos de la química orgánica son limitados y por lo tanto cada especie que se vale de algunas estructuras, tienden a buscar formas estables de manera que este pueda tener un buen comportamiento estructural:

“Esta economía de la sustancia, realizada con éxito extraordinarios especialmente en las plantas, los pájaros y los animales de rápido andar, deriva no de principio alguno de Mecánica general, sino de una necesidad teleológica, la lucha contra

---

<sup>15</sup> Ghyka, M. Estética de las proporciones en la naturaleza y en las artes. Editorial Poseidón, Buenos Aires, 1953 Pp 116. Revisión en línea: <https://catedrapernautfadu.files.wordpress.com/2017/04/ghyka-matila-estetica-de-las-proporciones.pdf>

la gravedad terrestre, para permitir a las plantas llegar a la luz, a los pájaros volar, a los animales correr o saltar. La arquitectura gótica ha tratado en forma análoga el problema del empuje vertical: lucha contra la acción de la gravedad; de igual modo, ha realizado una notable economía de materia con respecto a las alturas alcanzada”<sup>16</sup>.

En estos dos principios mencionados, cabe aclarar que las estructuras orgánicas e inorgánicas difieren de la arquitectura pues las escalas y los materiales se comportan de diferentes maneras, mientras el calcio y otros elementos dan rigidez, en un a escala mayor no podemos depender más que del concreto armado y el acero los cuales han llevado a estudios muy extensos para conocer estos materiales y conseguir mayor eficiencia, además que las proporciones de cada proyecto y escala impiden utilizar la geometría que ha ayudado al mundo orgánico hacer eficiente sus estructuras. Un ejemplo son las cúpulas, donde el coceo impide usar en estructuras laminares medias esferas, recurriendo

a la catenaria o al casquete de una cúpula para mejorar su comportamiento.

El comportamiento estructural queda entonces definido en una línea constante de obras que pretendían utilizar el mínimo de material cubriendo la mayor cantidad de claro, siempre explotando al máximo los materiales de la época dejando constancia de su capacidad técnica y económica de cada época, su dominio de las artes y su cosmogonía. Mientras avanzamos en la historia hasta la actualidad nos vamos acercando a mayor ligereza en las estructuras y como se mencionará más adelante de la eficiencia de la catenaria y la parábola, aparecen elementos como el arco ojival y elementos como los contrafuertes que permiten dar resistencia y mientras más simula o parece trazar en el arco la parábola resulta dar mayor eficiencia estructural.

En los sistemas de bóvedas y crucerías ya sea mampuesto o con materiales como la madera, el objetivo era dar mayor ligereza y resistencia.

---

<sup>16</sup> Ibid Pp125

“Las cerchas han sido parte sustancial de las cubiertas durante casi dos mil años. Una cercha es una estructura triangulada, de sección variable, autosoportante, que aprovecha al máximo el material del que está compuesto, minimizando los esfuerzos de las barras y respondiendo, con su forma eficientemente a su función.”<sup>17</sup> “Otro sistema estructural completamente distinto a los anteriores es el de las armaduras.

Estructuralmente se le ha estudiado para el cálculo por el método de la descomposición de fuerzas en dos o tres componentes menores y en determinada dirección al ensamblar las piezas; las barras son consideradas como “barras cortas” por lo tanto no existe el pandeo o la flexión, por lo tanto cada barra es analizada si sufre de compresión o tracción, omitiendo el par de fuerzas de que causan la deformación en los marcos rígido o en general de las estructuras de sección activa [...] este sistema estructural tiene como una de sus

---

<sup>17</sup> Gregorio García López De La Osa, tutor: dr. Mariano González Cortina, origen y evolución de la cercha [https://oa.upm.es/5872/4/TESIS\\_MASTER\\_GREGORIO\\_GARCIA\\_LOPEZ\\_DE\\_LA\\_OSA.pdf](https://oa.upm.es/5872/4/TESIS_MASTER_GREGORIO_GARCIA_LOPEZ_DE_LA_OSA.pdf)

principales características la descomposición de fuerzas en tensión pura o compresión pura. Otro aspecto importante es (que) son sistemas estructurales rígidos.<sup>18</sup>

Las estructuras han mantenido una línea en cuanto a evolución acerca del comportamiento y la transmisión de cargas, el primer cambio revolucionario pero que no rompe con el legado de las estructuras será el hierro colado, seguido de la revolución industrial, ya con la aparición del concreto armado. La aparición del concreto armado ha dado una evolución muy importante a dos tipos de estructuras: las estructuras laminares, cascarones y ferrocemento (estructura de forma activa) y el marco rígido de concreto armado (estructura de sección activa).

---

<sup>18</sup> Rosales Chiquín R, Guía teórica y práctica del curso tipología estructural, guatemala, octubre de 2004, universidad de san carlos de guatemala, facultad de ingeniería, [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_2491\\_C.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2491_C.pdf)

### I.II.1 GEOMETRÍA Y ESTRUCTURA

*“Se puede considerar diferentes tipos de optimización estructural; de dimensiones, formas o tipologías. En la optimización de dimensiones se busca el tamaño adecuado de los elementos previamente definidos. Su aplicación más usual es en las estructuras reticuladas (...), donde se define las longitudes y conectividades, para luego reducir la sección de las barras. En la selección de formas se busca definir la mejor configuración de las medidas generales de un elemento, tales como los nodos de un reticulado o el contorno en una estructura continua. En cambio, en la optimización topológica, se busca definir una forma que representa la mejor distribución de material dentro de un volumen finito, de forma tal que maximice algún desempeño”<sup>19</sup>.*

Como se ha podido notar en el resumen histórico comentado con anterioridad, el ser humano ha notado un comportamiento en las estructuras que ha querido razonar para tener una

---

<sup>19</sup> Lyon, A; García R. Forma arquitectónica y estructura a través de la optimización topológica. Nuevos métodos para antiguos problemas. Aus, núm 14 2013, pp 27-30

idea certera del comportamiento de las edificaciones, motivo por el cual ha llevado al estudio ya sea a través de la geometría<sup>20</sup> o de complejos sistemas de algoritmos apilados en programas informáticos como ocurre en la actualidad.

Los métodos geométricos que se han utilizado en la actualidad y refinados en la revolución industrial siguen siendo utilizados pues son una herramienta autodidacta de revisar el comportamiento de una estructura y sin dejarse atrapar por métodos matemáticos o las paqueterías por computadora, se han podido obtener

---

<sup>20</sup> “la geometría es la ciencia de las propiedades y relaciones de magnitudes en el espacio (diccionario oxford). La geometría es para el arquitecto una base y un medio disciplinar, un instrumento indispensable en el tratamiento de las formas que entran en la "composición" de los espacios. La geometría es una construcción del cerebro humano, si bien la observación de la naturaleza nos llevaría a considerarla como un conjunto de leyes que están fuera del hombre. Al observar los procesos de crecimiento de los minerales, de los vegetales y de los animales, la racionalidad humana, ha sido capaz de "reconocer" ciertas formas sencillas, hallando relaciones particulares entre ellas y en el interior de ellas, es decir, construyendo los sistemas de lógica matemática que se llaman geometrías”

<http://www2.caminos.upm.es/departamentos/matematicas/fdistancia/pie/chip%20geom%c3%a9trico/geometr%c3%8da%20y%20arquitectura.pdf>

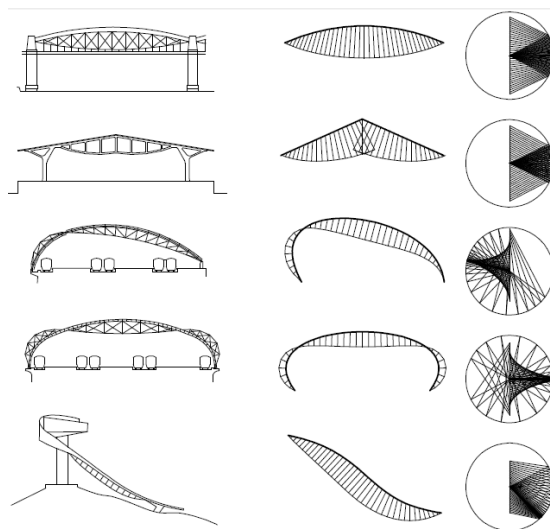
estructuras con un comportamiento impecable.

*“la forma de las cosas corpóreas se define en las tres dimensiones. Sin embargo, la arquitectura ha fijado mayoritariamente su interés en el análisis de la planta de los edificios, aunque es esencialmente tridimensional.*

*Es evidente que en los libros y en las escuelas se trabaja, se estudia y se habla mucho más de las plantas de los edificios que de su volumen, y este desequilibrio hace que a veces cueste entender problemas de forma que sólo se pueden comprender con una educación espacial correcta. La forma de las plantas de los edificios es, para este trabajo, un aspecto parcial de la forma (en) general.”<sup>21</sup> (Ilustración 7)*

En la enseñanza de la geometría las estructuras y construcción se disocian entre sí, principalmente en el leguaje que se usa para enseñar uno u otro tema provocando que el enfoque

utilizado en el proceso del diseño, no se apliquen los conocimientos que se adquiere en cada área, por lo tanto, al momento de tratar de aplicar las enseñanzas en cuanto a la forma y la geometría, se vuelve un caso difícil de abordar.



**Ilustración 7:** © Lachauer L, Kotnik T., “Ejemplos de construcción a la izquierda y ejemplos de geometrías de armadura de fuerza de cuerda a la derecha. Su similitud en el comportamiento estructural se vuelve obvia en los diagramas de fuerza. Desde arriba: Luis Brunel: Royal Albert Bridge 1859; Robert Maillart: Chiasso Shed 1924; Grimshaw Architects: estación de Waterloo 1993; Gerkan Marg + Partner: Lehrter Bahnhof 2002; Zaha Hadid Architects: Ski Jump 2001.”<sup>22</sup> , 2010, Ilustración. El polígono funicular lleva a la forma de una curva continua de cuerda colgante con un número creciente de segmentos.

En el caso de la historia de los arcos, bóvedas y cúpulas serán tal vez los ejemplos clásicos en el que la

<sup>21</sup> Crespo Cabillo, I. Control gráfico de formas y superficies de transición, Departamento D'expressió Gràfica Arquitectònica I, 2005, Pp. 10 <http://hdl.handle.net/10803/6559>

<sup>22</sup>Lachauer L, Kotnik T., Geometry of Structural Form, 2010, Escuela Politécnica Federal de Zúrich, Pp 7. <https://schwartz.arch.ethz.ch/Publikationen/Dokument/e/Geometry.pdf>

geometría sería el instrumento para definir una estructura aún más resistente, entendiendo que se había observado su resistencia ante las cargas de la misma cubierta y otras cargas, que derivaron en las bóvedas en saledizos y el arco de medio punto y es este último elemento formal que simplifica la respuesta a los esfuerzos que se vuelve muy socorrido por apegarse a la composición y la geometría, resultó muy eficiente para resolver diferentes estructuras en la antigüedad, cuestión que nunca perderá vigencia, pues lo más barato será siempre la utilización de mampostería propia del lugar y



**Ilustración 8:** © Hassan M, "Taq Kasra in Baghdad, Iraq", 2018, Fotografía Palacio de Ctesifonte, Mesopotamia cerca de Bagdad, Irak. Siglo III DC, bóveda de cañón. Nótese el pronunciamiento que se da en el área donde se encontraría la clave, para mejorar su comportamiento estructural, [https://es.wikipedia.org/wiki/Ctesifonte#/media/Archivo:Taq\\_Kasra.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Ctesifonte#/media/Archivo:Taq_Kasra.jpg)

construir bóvedas será un opción práctica no importa si estemos en la luna o en el lugar más apartado del mundo. Por ello, una cubierta como el palacio de Ctesifonte sería un referente para cubrir un claro de esa magnitud con excelente calidad, 25 metros de claro. **(Ilustración 8).**

No habiendo otra solución para dar la estabilidad estructural, el trazo de una estructura a base de un arco o bóveda de medio punto (según sea el caso), que desplazaron a las bóvedas en saledizo, el arco de medio punto fue usado recurrentemente hasta la llegada de otros arcos, como en el caso del arco ojival.

Recordemos que la geometría perfecta para trabajar la transmisión de cargas es la parábola y siendo el arco ojival un elemento que se asemeja a esta, transmite de manera más eficiente las cargas, transmitiendo las cargas de manera más vertical y proporcionando estructuras visualmente más livianas que llegaron a su punto de mayor esplendor en el gótico tanto en la fabricación de piezas

de mampostería como elementos estructurales.

En el gótico<sup>23</sup> se utilizan varias soluciones más apegadas a la arquitectura árabe que a la grecorromana, sobre todo es un nuevo planteamiento estructural, que conllevaba a nuevos sistemas organizativos de la construcción y nuevos conceptos, más abstractos, de la idea espacial.

Las variantes en la arquitectura gótica serán la manera en que se resuelven las crucerías de sus bóvedas y las medidas de las naves en planta y sección, que intentarán superar siempre algún reto de altura y será la iluminación parte fundamental de sus

---

<sup>23</sup>En el período conocido como edad media hay dos etapas notorias y el gótico comprende desde el siglo XII al XV considerada una etapa que perfecciona el dominio de la mampostería para crear esa ilusión de ligereza en sus contrafuertes, muros y pilastras, los cuales recibían complicadas bóvedas de crucería y abanico a las cuales integraban “nervios” que daban un relieve, integrando vanos con vitrales que aumentaban esa sensación de ligereza: Se percibía la calidad en los detalles en cada mampuesto. Esta etapa va desapareciendo poco a poco mientras aparece el renacimiento, el cual retoma el arte y la filosofía clásica, supuestamente de un despertar o renacer después de una “época oscura” ya que en estas catedrales góticas no se apreciaban los detalles grecorromanos.

edificaciones. *“Los arcos de varios centros y apuntados, las bóvedas nervadas, los arbotantes y los pináculos son elementos que construyen toda una nueva imagen de los edificios. Tanto en edificios civiles como religiosos. Las variantes en la arquitectura gótica serán la manera en que se resuelven las crucerías de sus bóvedas y las medidas de las naves en planta y sección, que intentarán superar siempre algún reto de altura o de luz. Los nuevos edificios cierran un espacio nuevo, más alto, más iluminado. La nueva forma del interior pasa afuera, la forma de los edificios se ve desde el exterior, su artefacto portante se exhibe y será su imagen.”*<sup>24</sup>

Esta tendencia de apoyarse en la geometría para el desplante de las estructuras es la piedra angular del diseño, que en este trabajo se pretende dejar claro como parte de la propuesta hecha con los alumnos del taller, el trazo se plantea desde el anteproyecto y se demuestra la eficiencia estructural en la construcción del edificio, muchas

---

<sup>24</sup> ibid

veces con resultados notables en un proceso de ensayo y error repetidos hasta definir la estructura final.

Los alarifes de las edificaciones de la arquitectura gótica, por ejemplo, ya intuían que el arco de medio punto no era muy eficiente, así que procuran una geometría que permitiera mayor esbeltez y eficacia en la edificación, es así como podemos ver su manejo del arco ojival, como una respuesta a esas fuerzas que afectan a los arcos y bóvedas. Su percepción acerca de la eficacia de los arcos de medio punto llevó a la creación de varios arcos con diferentes resultados en la edificación, como el caso de la técnica árabe y catalana.

Pasarían cientos de años para tratar el tema en la edificación, con la aparición de la geometría analítica y el cálculo gráfico en la estática donde se observaría que la forma que mejor responde a las fuerzas sería la catenaria y la parábola. Las soluciones estructurales en el siglo XIX, las formas ocupadas en el diseño se conocen se fueron aproximando a la catenaria y la parábola gracias a

que comenzaban los estudios de las formas no euclidianas y el uso de sistemas gráficos para el diseño de elementos estructurales, dando lugar a la interpretación de modelos funiculares y diagramas de fuerzas. Si analizamos los elementos estructurales por medios gráficos del polígono de fuerzas y de modelos funiculares para determinar la configuración de la estructura, nos podremos percatar que la geometría que se obtiene invirtiendo estos esfuerzos es una parábola. Dentro esta etapa de la historia no se habla de cálculo, al menos no como el que se utiliza hoy en día, si no de la utilización de gráficas que permiten interpretar una forma, la cual definirá el trazo idóneo para soportar los esfuerzos. Denominado aquel entonces como estática gráfica.

“El objetivo básico de la estática gráfica es la de resolver el equilibrio estable de un objeto por medio de dibujos exactos. La base conceptual de estos gráficos se puede encontrar en el axioma del paralelogramo de fuerza, el cual fue aplicado ya por Leonardo Da Vinci (1452-1519). La



estática gráfica conocida actualmente se inicia con la publicación de la monografía editada por Karl Culmann (1821-1881) en los años 1864-66 de similar nombre. Ya en 1860, Culmann dictaba clases de estática gráfica en la escuela politécnica de Zürich (suiza). Según Cullmann: la estática gráfica es la aplicación de la nueva geometría para realizar tareas accesibles al campo de la ingeniería que permitan encontrar soluciones a problemas de equilibrio de los objetos. Culmann entendía como nueva geometría al tratado desarrollado por Jean Victor Poncelets (1788- 1867) sobre "**Traite Des Proprietes Projectives Desfigures**" que hoy se conoce como geometría descriptiva. Para esto, se apoyó Culmann en la relación introducida por Pierre Varignon en la composición y descomposición de las fuerzas."<sup>25</sup>

El trabajo de varios arquitectos ha sido muchas veces bajo la observación y el dominio de la geometría, antes que de un análisis estructural basado en el

cálculo. Esta percepción geométrica-estructural que ha dado esta variedad de soluciones que conocemos hoy. Aunque en la actualidad existen sistemas informáticos que han llevado a soluciones aún más variadas y complejas, no consideramos que un software y su uso sean propios a los objetivos de este trabajo, pues la cercanía a los modelos por computadora antes que las estructuras mismas no permitirán al alumno a diseñar las estructuras. Refiriéndose a que estas paqueterías comúnmente se utilizan para una estructura dada y definida y no para la exploración de una estructura durante el proceso de la concepción formal.

Los conceptos estructurales sobre el uso de la forma y la estructura tienen gran peso y valor en cuanto aparece los trabajos de Eduardo Torroja, Gaudí o Candela, donde el cálculo pasa a segundo término pero su trabajo práctico les permite acuñar a la arquitectura las estructuras de superficies regladas, los cascarones de concreto o estructuras laminares, así como la "eficiencia por forma" cobrando un nuevo significado en la

---

<sup>25</sup> Guillermo José J., el diseño estructural por medio de los métodos gráficos, <http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/com2004/7-Tecnologia/T-088.pdf>

arquitectura, principales exponentes en el manejo de la geometría y su aplicación a la estructura, nunca le pusieron nombre a su trabajo pero hoy conocemos conceptos como mecametría (concepto acuñado por el Dr. Juan Gerardo Oliva), como un concepto que fusiona la geometría con la mecánica ejercida por las estructuras, recientemente han aparecido otros conceptos que se han apoyado de los ordenadores para poder ejecutar este tipo de estructuras. Conceptos como la “morfogénesis estructural”<sup>26</sup>, “form finding” y el bio-mimetismo que pretenden utilizar la geometría o

---

<sup>26</sup> Citando el trabajo del arquitecto Eric Valdez Olmedo “el mencionar el término morfogénesis, tiene la implicación de hacer referencia a su origen etimológico del griego morphé–forma y génesis–generación, para asociarlo con la práctica del diseño en esta búsqueda perfectible e inacabable de la forma. Sobre este término destaca la referencia del biólogo y matemático escocés d’arcy wentworth thompson (1860 – 1948) con su libro el crecimiento y la forma (on growth and form) publicado en 1917. Particularmente en el capítulo forma y eficiencia mecánica, se puede advertir una discusión de las adaptaciones directas, casos en los que las fuerzas mecánicas actúan sobre una estructura viva de manera que la modifican y la hacen mecánicamente eficiente<sup>2</sup>. Morfogénesis estructural arquitectónica describe entonces, la generación de la forma más adecuada para una estructura portante, en la construcción del espacio destinado al habitar, en el entendido de la condición ambivalente que juega la estructura en el objeto arquitectónico “siguiendo a la forma” o “siendo la forma en sí misma”. Valdez Olmedo E. Arquitectura textil en México: morfogénesis estructural con membranas flexibles y medios computacionales. División de ciencias y artes para el diseño, uam Xochimilco

inspirarse en la naturaleza, respectivamente. Al final es la optimización de la estructura, siendo la más ligera posible para que el peso excesivo sea contraproducente a la estructura en general. Han pretendido seguir con ese legado de la construcción de estructuras a base de formas relativamente ligeras, pero abundaremos en los trabajos que han pretendido realizar estructuras fuera del apoyo del software, sino de ejercicios más didácticos que el futuro arquitecto le permita analizar el espacio que ha resultado relativamente fácil con el croquis y las maquetas de trabajo, sin profundizar en el parametricismo<sup>27</sup>.

Estos antecedentes orientan este trabajo sobre las soluciones que los alumnos deberán percibir, pero no

---

<sup>27</sup> “el uso del término ‘paramétrico’ dentro del contexto del diseño computacional surge y se populariza en la década de los setenta referido a la manera como poder representar curvas complejas–splines, nurbs- a través de definiciones matemáticas y variables manipulables denominadas ‘parámetros’. No es la mano alzada sino el conjunto de parámetros y reglas que genera la forma. Y si se modifica alguno de los parámetros o alguna de las éstas reglas, de manera automática se regenera el objeto final.”

Jordi Soler Solà. Barcelona, septiembre de 2013. ‘form finding’ y fabricación digital en hormigón armado

[https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/19680/1/jordisoler\\_tfm.pdf](https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/19680/1/jordisoler_tfm.pdf)

permitirán cumplir con los objetivos si desviamos nuestra atención al diseño por computadora u otros mecanismos que aíslen al alumno del problema constructivo-estructural de una edificación. Antes que nada, el alumno tendrá que ser perceptivo de la estructura, saber que existe y cómo se aplica a sus propuestas espaciales, con ideas primordiales de las secciones que los elementos estructurales han de tener, ese valor estético que antes que calcular, se conciben. Como dice Guillermo José J:

“A partir de 1980, cuando se inicia el proceso de uso generalizado de la informática, tanto en el campo de la arquitectura como en el de la ingeniería, como herramienta de trabajo, se transformó el calculista como eje central del proceso de diseño, por medio de los paquetes informáticos de cálculo y planillas de cálculo electrónicas, perdiendo espacio el factor diseño y el estético de la forma estructural.

Por lo tanto, es necesario recuperar a la estática gráfica aplicada en la

construcción de objetos arquitectónicos, como factor didáctico de enseñanza superior técnica, pero con las bondades que brinda actualmente la informática.”<sup>28</sup>

Entiéndase que no es una negativa o desprecio a los sistemas computacionales, los cuales no sólo desarrollan un cálculo con mayor facilidad y velocidad sino también lo certero que son. Sin embargo, para una experiencia didáctica, de entendimiento de las estructuras y de su trabajo en la maqueta de trabajo, así como la aplicación de la geometría en la elaboración de las propuestas, será fundamental para la formación de alumno.

---

<sup>28</sup> Guillermo José J., el diseño estructural por medio de los métodos gráficos, <http://www.unne.edu.ar/unnevieja/web/cyt/com2004/7-tecnologia/t-088.pdf>

## I.II.2SISTEMAS ESTRUCTURALES

*“Un método numérico es un proceso matemático iterativo cuyo objetivo es encontrar la aproximación a una solución específica con un cierto error previamente determinado.”<sup>29</sup>*

Para el entendimiento de cómo un arquitecto debería abordar una estructura, se recomienda pensar en esta como “un todo” donde primero se analiza su comportamiento como un conjunto y no como el análisis de las secciones basado en las matemáticas, no necesariamente en el proceso de anteproyecto. Las estructuras, aparecieron antes que el cálculo el cual busca aproximarse a estas para entenderlas y definir un todo y sus partes.

Para abordar el análisis de los diferentes sistemas estructurales, se recurre a la clasificación que realiza el

Ing. Heino Engels<sup>30</sup> el cual considera el comportamiento estructural y la manera de transmitir los esfuerzos como condicionantes para clasificar dichas estructuras, el cual sirve para comprender cómo trabajan primero, antes que dimensionarlas o calcularlas.

La relevancia de esta clasificación es que resulta sencilla de explicar y referenciar no con métodos matemáticos sino a través de maquetas de trabajo, siendo los que se enlistan a continuación.

1. Estructura de superficie activa
2. Estructura de sección activa
3. Estructura de vector activa
4. Estructura de forma activa.
5. Estructuras de altura activa

Cabe mencionar que las Estructura de altura activa no son abordados en este trabajo ya que este trabajo no llevó a cabo ni se plantearon ejercicios aplicables para que los alumnos ejecutaran en clase, por este motivo y aunque las estructuras de sección

---

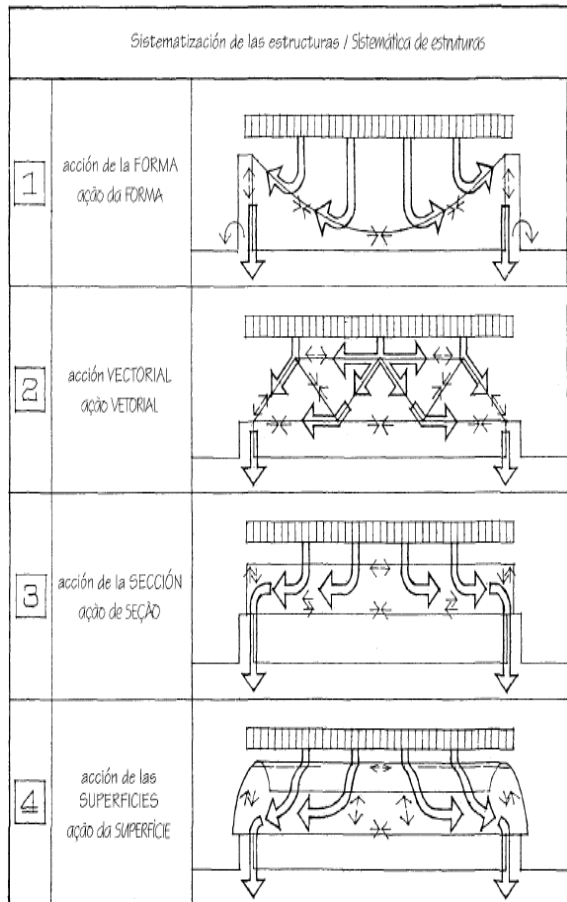
<sup>29</sup> *Aproximación numérica y errores*, Cortés Rosas J, González Cárdenas M, Pinilla Morán V, Salazar Moreno A, Tovar Pérez V, Plataforma educativa para Análisis Numérico, realizado con el apoyo del Programa UNAM-DGAPA-PAPIIME PE105717, [https://www.ingenieria.unam.mx/pinilla/PE105117/pdfs/tema1/1\\_aproximacion\\_numerica\\_y\\_errores.pdf](https://www.ingenieria.unam.mx/pinilla/PE105117/pdfs/tema1/1_aproximacion_numerica_y_errores.pdf)

---

<sup>30</sup>Heino Engel. *Sistemas de estructuras*. Editorial Gustavo Gili s.l. Barcelona, 2006. 1ª edición Pp 42

activa tampoco se realizaron ejercicios aplicables, se requiere para dar contexto y entendimiento de los ejercicios que aquí aparecen.

**(Ilustración 9)**



**Ilustración 9:** ©Heino Engels “Sistematización de las estructuras en la edificación”, 2006, Ilustración de los sistemas estructurales<sup>31</sup> Diferentes sistemas estructurales que determina y explica Heino Engel: En esta tabla se habla de las estructuras que se hablarán en este trabajo, cada una está ilustrada con flechas que indican cómo se distribuyen las fuerzas sobre la estructura en cuestión. Las flechas pronunciadas indican cómo recibe las cargas, mientras que las flechas de menor tamaño muestran el comportamiento local de las fuerzas

Cada uno de estos tipos de estructuras son clasificados así porque se comporta estructural de manera diferenciada, sino también sus sistemas constructivos, la transmisión de las fuerzas que en las estructuras actúan y entonces habrá que entenderlas como tal. Sus características formales para su aplicación al diseño, se requiere darle un tratamiento diferente para poder solucionar cada uno de estos sistemas estructurales.

Se explican sus características a continuación a modo de que se entienda la importancia de cada uno y enfocándonos en las primeras cuatro, pues serán estos en los que en se basará nuestro trabajo, en la segunda parte se abordarán los ejercicios realizados con los alumnos.

<sup>31</sup> Heino Engel. Sistemas de estructuras. Editorial Gustavo Gili s.l. Barcelona, 2006. 1ª edición Pp 39

### I.II.3 ESTRUCTURAS DE FORMA ACTIVA Y SUPERFICIE ACTIVA

Como es conocido, un cable suspendido soporta las cargas a tensión, así como en el caso del arco este soporta los esfuerzos a compresión, bajo estas dos premisas históricamente comprobables se manifiestan estructuras que se basan en estos fundamentos que se les conocerá como estructuras de “forma activa”, pues es la forma la que le da estabilidad. Los ingenieros y arquitectos han sabido utilizar este tipo de estructuras y generar diferentes propuestas arquitectónicas. Este comportamiento de compresión y tracción “puras”, están definidos por dos formas geométricas: la catenaria y la parábola, la primera como un objeto que trabaja suspendida y la segunda a compresión.

La diferencia entre las estructuras que denomina Heino Engels como “forma activa” y las “estructuras de superficie activa” se da en que las primeras pueden ser solamente “el esqueleto” de una estructura, pues los segundos trabajan como un “casarón” una superficie que trabaja en conjunto para

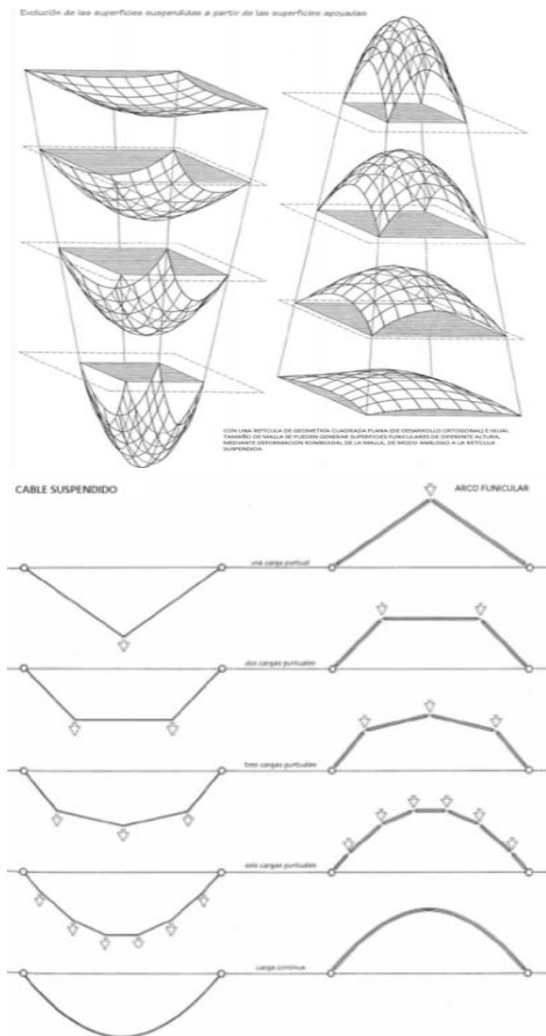
definir la estructura como sucede con las estructuras como el ferrocemento o las estructuras neumáticas. Para definir de manera empírica la forma de la catenaria, nos basamos a lo que J. Bernoulli definió como la curva dada por una cadena suspendida denominado como **catenaria**<sup>32</sup> y en el caso invertido se le conoce como un “arco parabólico”, respondiendo a la tensión y a la compresión, respectivamente.

Esta respuesta geométrica se descubre desde las civilizaciones agrícolas que derivaron en las diferentes arcadas y cúpulas de diferentes formas, pretendiendo con dada una mejorar la estabilidad estructural, ligereza y ejecución práctica en obra. Sea cual fuere el caso, lo impresionante es lo que a continuación los arquitectos hicieron ya sea con la parábola o la catenaria, pues hasta el renacimiento se consideraban las figuras euclidianas

---

<sup>32</sup> Jacobo Bernoulli (1654-1705) propuso el siguiente problema en la revista *acta eroditorum*: hallar la curva formada por un hilo pesado, flexible, inextensible y de densidad constante en toda su longitud, fijo o suspendido en sus dos extremos. Este problema fue resuelto por él mismo conjuntamente con su hermano Juan Bernoulli (1667- 1748) y Charles Huyghens (1629-1695) y publicado en esa revista el año 1691.

como las figuras perfectas para su aplicación en la arquitectura, ignorando a otro tipo de geometría. **(Ilustración 10)**



**Ilustración 10:** Arriba: ©Heino Engels “evolución de las superficies suspendidas a partir de las superficies apoyadas”, 2006, Ilustración. Abajo: ©Heino Engels “Relaciones entre cables suspendido y arco funicular”, 2006, Ilustración de los sistemas estructurales. Para obtener la forma de una cúpula y un arco con un mejor desempeño, se recurre al método de la catenaria (del latín *catena*, cadena), se invierte una cadena o una cuerda suficientemente pesada y esta forma, al invertirla, será el trazo para dicho elemento.

Un claro ejemplo es el trabajo realizado por Apolonio de Perga, en el s. III, dejando testimonio de que en la antigüedad ya se conocían formas no especificadas por Euclides, pero se requería del conocimiento de la geometría analítica para poder trazar dichas formas.

Los trabajos que han hecho una aproximación sencilla pero efectiva han sido el trabajo de “maquetas funiculares”, conocidas así por el comportamiento natural de una cuerda que al suspenderse, teniendo sobre una cuerda una carga uniforme la cual la deforma por la aplicación de tensión pura y por lo tanto, al invertir esta cadena, obtenemos un elemento con fuerzas completamente a compresión, lo que disminuye significativamente ese par de fuerzas denominadas en conjunto Flexión, que podría complicar el comportamiento de la estructura y hacerla fallar.

En el caso de las estructuras de superficies activa y las estructuras de forma activa, existe una diferencia básica, que las estructuras de superficie activa engloban

principalmente cascarones, una “membrana” en el que la estructura no son solo tirantes o costillas, sino toda la superficie, toda la cubierta que trabaja en conjunto. El ferrocemento es un ejemplo claro, que consiste en una superficie que se generan a través de la geometría (el desplazamiento de una línea sobre una directriz) o un tipo diferente de maquetas funiculares que, en vez de utilizar una cadena suspendida, se basa en la suspensión de una membrana.

Las diferentes estructuras de superficie activa realizadas se basaron en las estructuras plegables, los cascarones y el ferrocemento. Cada una se diferencia por su sistema constructivo entre sí y por lo tanto cada uno requiere ser abordado con algún tipo de maqueta que sea capaz de apreciar la estructura, la forma y su vínculo entre estas.

Si algo tiene en común es que, en la mayoría de los ejemplos son usados como cubiertas y no como un sistema de entresijos y elementos portantes, pero su diversidad formal pone en evidencia su importancia. La obtención

de la geometría resulta sencilla, apta para trabajar con los alumnos del primer año, donde se establece el estilo de trabajo y su disciplina, estos ejercicios le permitirían incluir en el ejercicio de su trabajo la elaboración de maquetas con la simplicidad que requiere resolver un proyecto y la practicidad que demanda la construcción. Se profundizará más adelante.

En la búsqueda de la optimización de la estructura no sólo es la sección de las piezas para un comportamiento regional, además se deberán seleccionar una estructura en general, una envolvente que contemple sus partes formando un todo, esto ha llevado a ensayar maquetas donde se analicen todas las partes y es en este sentido que tienen en común las estructuras de superficie activa, se han analizado formas de la estructura en su conjunto y las secciones de la misma analizadas en maquetas a escala, pues toda la superficie se comportará como una estructura, donde la alteraciones de las cargas y secciones regionales de la sección pueden afectar la forma definitiva.



“las estructuras laminares se han construido desde la antigüedad, denominados así por su relación espesor/longitud que son consideradas como láminas. Es por eso que ejemplos de este tipo de estructuras más antiguos y representativos son El panteón de roma y la iglesia de Santa Sofía en Estambul. Después de la época romana las tradiciones de cúpulas continuaron hasta el siglo XVII. [...] guiados por los ingenieros de renombre como Pier Luigi Nervi, Eduardo Torroja, Anton Tedesko, Nicolas Esquillan, Félix Candela y Heinz Isler un período de floración de construcción de cáscara generalizada tuvo lugar entre 1950 y 1970.”<sup>33</sup>

Las estructuras de superficie activa son estructuras que existen gracias al concreto armado, pues no hay otro material que permita tanta libertad para crear las diferentes formas que han regido a estas estructuras, un trabajo iniciado por Eduardo Torroja

con gran éxito. En el caso del arquitecto Gaudí, existe un análisis similar, una línea que sobrevive con las obras de Heinz Isler y Fruto Vivas, entre otros. Gaudí [...] “analizó los principios de los modelos funiculares que se constituyeron en su principal herramienta de diseño debido a la interacción entre la geometría y la mecánica.

Otros ejemplos que se pueden citar son el “MEISO NO MORI CREMATORIUM”, proyecto del arquitecto japonés Toyo Ito. En esta propuesta podemos ver una serie de bóvedas de concreto armado conectadas entre sí a través de una transición que le permite fusionar columnas con las bóvedas, otorgándole una estructura orgánica, a tal grado que elementos como una viga o capitel que reciban la bóveda para que descansen estos elementos sobre la columna, quedan inferidos, pero no aparentes, creando así una estructura sinuosa en sus tres dimensiones.

---

<sup>33</sup> Analysis of thin concrete shells revisited: opportunities due to innovations in materials and analysis methods trad. Autor. [Http://homepage.tudelft.nl/p3r3s/msc\\_projects/report/peerdeman.pdf](http://homepage.tudelft.nl/p3r3s/msc_projects/report/peerdeman.pdf)

Estas bóvedas forman una serie de ondulaciones donde la parte del valle recibe la carga que la bóveda representada por la cresta, pero a la vez la cresta sirve de capitel para descansar sobre las diferentes columnas que se aprecian en toda la estructura, sin duda una estructura interesante debido a su complejidad en la ejecución del cimbrado y colado de esta superficie (**Ilustración 11**).

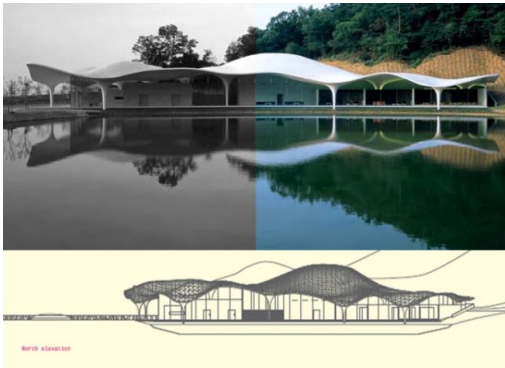


Ilustración 11: **Arriba:** © Shinkenchi-sha, <<Sin título>>, 2006, Vista y elevaciones del "MEISO NO MORI CREMATORIUM" diseñado por el arquitecto Toyo Ito en colaboración con el ing. Estructural Mutsuro Sasaki, este trabajo muestra el manejo de una estructura de superficie activa y su relación entre la forma y la estructura, se nota la superficie sinuosa que el concreto armado puede tomar. En la vista se puede observar la escasez de apoyos, resuelto con una cubierta alabeada que simula a una cúpula, pero en este caso todo armado como una sola pieza <http://210.10.254.97/CplusA/issue10/Meiso%20no%20Mori%20Issue%2010.pdf>. **Abajo:** © Shinkenchi-sha, <<Sin título>>, 2006, Ilustración del alzado norte, muestra las líneas que forman la superficie, las cuales serán necesarias para determinar la ubicación de la cimbra: Una sucesión de tiras de madera que darán forma al concreto. <http://210.10.254.97/CplusA/issue10/Meiso%20no%20Mori%20Issue%2010.pdf>

Como antecedente de estos trabajos será Gaudí, quien "[...] descubrió que la simetrización<sup>34</sup> de la catenaria daba lugar a uno de los arcos más perfectos "el más racional y mecánico de los arcos", el único que adopta perfectamente la línea de presiones, que distribuye los esfuerzos a compresión pura y siempre bajo la dirección y sentido de la resultante de fuerzas, lo que lo llevó a utilizar maquetas funiculares para la comprensión de la lógica estructural"<sup>35</sup>. A estos sistemas para la construcción de vivienda de interés

---

<sup>34</sup> "las primeras concepciones sobre simetría arquitectónica identificaban simetría con la proporción, el equilibrio y la belleza. Vitruvio la define como "el vínculo armónico de cada uno de los miembros del edificio respecto a la figura global de la obra". Esta concepción influyó notablemente en el renacimiento: durero, miguel angel, piero de la francesca, paccioli, leonardo da vinci,...contribuyeron al estudio de la simetría sin desligarla del proporcionado de la obra. La referencia de palladio I Quattro Libri Dell'architettura: "entiendo que los edificios deben parecer un entero y bien definido cuerpo en el que un miembro convenga al otro y todos los miembros sean necesarios a aquel que se quiere hacer [...]".

Con este concepto de simetrización, entendamos que gaudí será el primer arquitecto que se ingeniará el uso de la catenaria para la edificación, otorgándole así esa armonía en la ejecución de la obra. Como se comentó con anterioridad, apolonio ya había descrito las cónicas, pero tal vez el proceso constructivo de la arquitectura clásica o el trazo de estas no permitían su uso. Esa es la importancia del trabajo de Gaudí

<sup>35</sup>cables y arcos: [www.farq.edu.uy/estabilidad-i/files/2012/02/estructuras\\_traccionadas.pdf](http://www.farq.edu.uy/estabilidad-i/files/2012/02/estructuras_traccionadas.pdf)

social y algunas estructuras ligeras con el concepto de “estructura ligera” se basan en las formas derivadas del ejercicio realizado por el arquitecto Gaudí, (**Ilustración 12**) para definir geoméricamente estructuras ligeras y resistentes justificando que la materia prima es usada con eficiencia y por lo tanto un ahorro en el volumen de obra.<sup>36</sup>



**Ilustración 12:** © Joan Bertrán, 1898-1908 “Maqueta Funicular para la Iglesia de la Colonia Güell. Barcelona. Antoni Gaudí.” Fotografía. [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/19680/JordiSoler\\_TFM.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/19680/JordiSoler_TFM.pdf).

Las edificaciones que han servido como ejemplo en los últimos años para este tipo de estructuras son las velarías o estructuras atirantadas que

<sup>36</sup> Conocido como el principio de la economía de la sustancia del mundo orgánico: Ghyka, M. Estética de las proporciones en la naturaleza y en las artes. Pp 116.

absorben las tensiones a través de los perfiles usados como mástiles y los tensores que absorben la tensión, manteniendo la geometría de la membrana manejando las maquetas funiculares basadas principalmente en cables o perfiles ligeros, como se observa en la.

Un ejercicio que se puede analizar fácilmente es una estructura de una base cuadrada, la cual se suspenden de esta ya sea una serie de cadenas o un “manto” el cual se recubre ya sea con yeso u otro aglutinante para darle esa carga uniforme sobre la cubierta. (**Ilustración 13**)



**Ilustración 13:** Heinz Isler (abajo). © Kotnik T. Y Schwartz J Study of shell forms at Isler’s office, Study of shell forms at Isler’s office , 2011. La complejidad de tener un proyecto varias bóvedas y niveles, le llevó a Gaudí de un estudio más específico y a detalle para definir cada elemento y su forma, mientras que Isler realiza el colganteo de un manto, con diferente número de apoyos, siendo un solo elemento estructural. <https://www.schwartz.arch.ethz.ch/Publikatione/n/Dokumente/Isler.pdf>

Al invertir esta estructura reacciona perfectamente a las cargas (no puntuales<sup>37</sup>) y con ello diferenciamos con las estructuras de sección activa, en las primeras será la forma la que responda a las cargas de servicio y las segundas dependerán del momento de inercia y el material del que se compone la sección de los marcos rígidos (principalmente perfiles estructurales y concreto armado). Ya entrado el primer cuarto del siglo veinte y a pesar de la aparición con mayor industrialización de los materiales, la geometría guiaba las soluciones estructurales debido a que se está pensando en la estructura como un todo que se relaciona entre sí.

Varios arquitectos han recurrido a este proceso para la obtención de la forma pues existe una interacción inmediata entre la propuesta y su comportamiento estructural...

“es el caso de las obras de otro catalán, Antonio Gaudí, quien también utilizo la misma metodología de diseño y el mismo material de construcción, ladrillo común, y también, piedras

---

<sup>37</sup> Carga concentrada en un área

talladas. Algunos otros contemporáneos de Gaustavino y Gaudí, también utilizaron el método gráfico de la estática como herramienta de diseño, pero optaron por otros materiales, más revolucionarios que el tradicional ladrillo común, como ser Gustaf Eifel con los perfiles y chapas metálicas, Robert Maillart con el hormigón armado.<sup>38</sup>

La estructura de ladrillos comunes más tradicional y con historia en la cultura occidental fue conformada por el “arco”, la “bóveda” y la “cúpula”, producto de la herencia dejada por la arquitectura romana en Europa occidental<sup>39</sup>. Este sistema de diseño sobrevive y es muy didáctico para observar el comportamiento estructural más añejo en la arquitectura que han cubierto grandes claros. El fundamento para las maquetas realizadas con los alumnos viene de los ejercicios que varios

---

<sup>38</sup> el ladrillo cerámico cocido como materializador de la estructura en la edificación arquitectónica, Jacobo Guillermo J. <http://arq.unne.edu.ar/publicaciones/comunicaciones06/ponencias/jacobo1.pdf>

<sup>39</sup> ibid

arquitectos realizaron para definir la forma idónea que se abordan en este trabajo, resulta entonces en una compilación sobre un tema recurrente entre maestros que han pretendido resolver de una manera integral la forma y la estructura, fundamental para la construcción de estas estructuras.

A pesar de que existen varios materiales, las maquetas funiculares son fundamentales para entender estas estructuras: consisten entonces del tendido de un materiales que nos sirva de base para verter algún cementante para que esta, aplicando un peso sobre la superficie colgada, “deforme” el material hasta que este se rigidice y así al invertir este modelo, obtendremos la forma que resistirá las cargas que a esta se le apliquen sin importa el material, pues como se leerá en las siguientes páginas, podrán ser de concreto armado, ferrocemento y poliuretano esreado.

Otra manera de realizar este ejercicio será colgar una serie de cadenas unidas entre sí para simular que se trata de una cúpula, esto permitirá

conocer la forma que sustentará a la cubierta, usando en la maqueta el material que le da su nombre a la catenaria, siendo un principal exponente en cuanto a ejercicios, el ingeniero Frei Otto. Mientras que Fruto Vivas realiza modelos colgando alguna tela revistiéndola de algún mortero, Frei Otto hace lo propio con varias cadenas, concluyendo con una forma empíricamente correcta

Cabe mencionar que las cargas puntuales son perjudiciales para este tipo de estructuras, por lo tanto, se tendrán que evitar en la construcción de cada una de estas propuestas, si tomáramos alguna analogía el huevo que consumimos, es un claro ejemplo: un cascarón capaz de soportar con eficiencia la presión de nuestra mano hasta que lo golpeamos.

Un material recurrente y que tomaremos de base para explicar las diferentes soluciones adoptadas por los arquitectos que trabajaron con las estructuras de forma activa, será el concreto. El concreto ha sido utilizado por su facilidad para moldear formas no desarrollables con la geometría

euclidiana, varios arquitectos e ingenieros han tomado esta ventaja para darle cualquier forma utilizando la geometría para contrarrestar “el momento último”<sup>40</sup>.

Será “el momento de inercia del material” para absorber tales esfuerzos, dando variantes en el concreto como son: losas macizas, losas nervadas, losas reticulares o encasetonadas y las cubiertas plegadas, cada una oponen resistencia a los esfuerzos, hablando del mismo material y las intenciones formales de diseño, por ello los arquitectos han sido los responsables de anteponer el concreto armado y el ferrocemento sobre las estructuras de acero.

En este enfoque de la resistencia de materiales y el momento de inercia, ha llevado a la creación de diferentes entresijos y cubiertas, siendo cada una un elemento estructural que poseen sus propias características, sin afán de profundizar se muestran, a manera de ejemplo, en la que algunos

casos la geometría ha sido fundamental.

Gaudí emplea generalmente materiales pétreos y por lo tanto estos materiales ofrecen poca resistencia a la tracción. Por ello fue indispensable conocer la forma de toda la estructura para que se encuentre totalmente a compresión y por lo tanto era indispensable que este fuera un arco parabólico en toda su expresión y así permitir que **las líneas de presiones no generen tensiones**, lo que permite garantizar la estabilidad.

Esta característica se logra adaptando la forma y proporción estructural de la construcción al perfil simétrico del funicular espacial de equilibrio de los hilos suspendidos, permitiendo pasar de la maqueta tensada a la obra de piedra comprimida. En la actualidad se utilizan programas de computadora para entender el comportamiento general de una estructura y en este caso, Gaudí refleja en su trabajo, la interpretación de un modelo general y (obvio) evita un análisis aislado de la estructura. En la actualidad se utilizan programas de computadora para

---

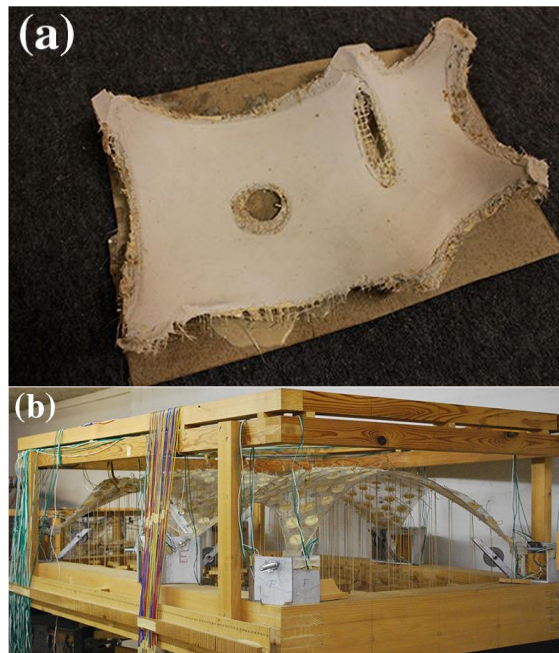
<sup>40</sup> El momento es

entender el comportamiento general de una estructura y en este caso, Gaudí refleja en su trabajo, la interpretación de un modelo general e integral de la estructura, un todo y sus partes.

Algunos de los trabajos que se ilustran aquí siguen de cerca los métodos de formación de la cáscara de Heinz Isler, que utilizó modelos funiculares a pequeña escala para determinar la geometría de la construcción a gran escala y el comportamiento estructural de conchas finas de concreto armado.

Se puede notar que en la estructura para la fábrica Sicli S. A. tiene una forma muy peculiar, incluso en este contexto de estructuras con geometría no euclidiana, pues no pierde ese toque de parecer una tela tensada de alguna manera y esto se debe a que, en definitiva se utilizó una tela suspendida para la definición final de la forma, algo que no es común ya que en otras estructuras se define una función para determinar la ecuación que permita trazar la forma de la estructura, un mérito de las obras del ingeniero Isler que demuestra la

viabilidad en el uso de las maquetas funiculares. **(Ilustración 14).**



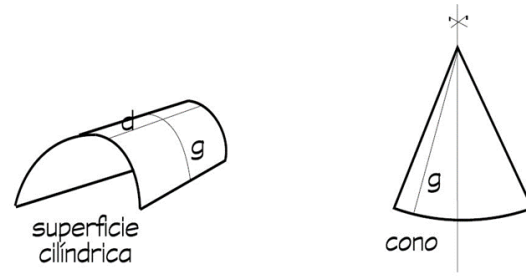
**Ilustración 14:** a) © Heinz Isler, archivos de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich, Croquis de la fábrica Sicli S. A. elaborado por Heinz Isler, 2016, Ilustración: **b)** © Heinz Isler, Modelo experimental sobre tejido de rejilla rectangular para la fábrica Sicli, 2016, fotografía **c)** © Heinz Isler, archivos de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich, modelo a gran escala de resina epóxica que estudia la resistencia de la superficie seleccionada para la estructura, fábrica Sicli S. A., 2016, fotografía construida entre 1968-1969 <https://nottingham-repository.worktribe.com/OutputFile/801802>

#### I.II.4 FUNDAMENTOS PARA REALIZAR ESTRUCTURAS DE FORMA ACTIVA

Entendamos que una superficie reglada es una línea denominada como generatriz en el que se traslada, a través de un eje u otra línea conocida como directriz. Bajo este concepto las superficies alabeadas y no desarrollables tienen un fundamento para construir las a manera de explorar formas y dar soluciones estructurales, desde el cono y el cilindro hasta el hiperpar (paraboloide hiperbólico) y el hiperboloide. Bajo esta premisa, los ejercicios propuestos fueron dados para estudiar la relación entre las diferentes superficies regladas con los cascarones y estructuras laminares.

Una recta se viaja a través de un eje o una generatriz, se traduce a que esta línea representa una tira de madera que será parte de la cimbra y es la importancia de este entendimiento que las estructuras que a continuación se describirán, se pueden construir. Se clasifican en dos tipos: de curvatura simple y de doble curvatura. Las de simple curvatura o desarrollables, son

llamadas así a las que “cuando la curvatura en un punto dado es del mismo signo en todas las direcciones, excepto en una de ellas (recta generatriz) en que vale 0. Ejemplos: cilindros y conos”<sup>41</sup>. **(Ilustración 15).**



**Ilustración 15: Superficies de simple curvatura generadas por el desplazamiento de una línea recta llamada generatriz, que se desplaza por una línea curva llamada directriz. Cono (a) y cilindro (b).** © Ing. José María Canciani <http://apuntesdearquitecturadigital.blogspot.com/2013/03/introduccion-las-estructuras-laminares.html>

Las superficies de doble curvatura son: [...] Sinclásticas: cuando la curvatura en un punto dado es del mismo signo en todas las direcciones. Ejemplos: cúpula (esfera), paraboloide elíptico, elipsoide, hiperboloide de dos hojas. **(Ilustración 16)**. Interesante En esta propuesta los alumnos realizaron la interpretación de la geometría de esta obra, desarrollando la forma la cual se revoluciona para formar la

<sup>41</sup><https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/30402/Estructuras%20laminares.pdf?sequence=1>



columna y el fuste con la forma para unir con la

2. Anticlásicas: cuando la curvatura en un punto es positiva en algunas direcciones y negativa en otras. Ejemplos: paraboloides hiperbólicos, conoide, hiperboloide de una hoja<sup>42</sup>

(Ilustración 16)

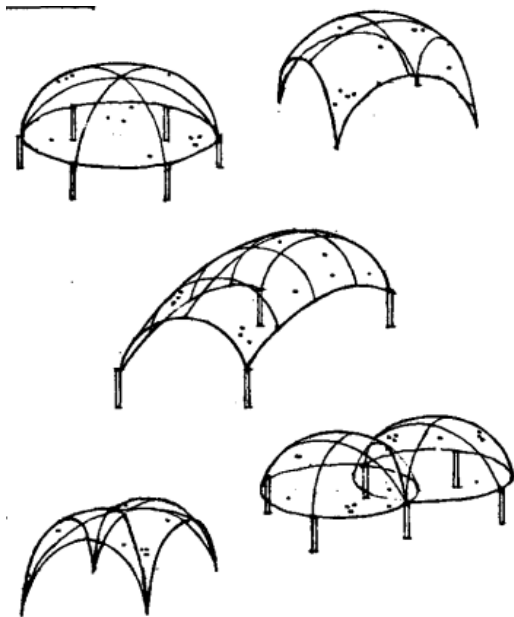


Ilustración 16: 4.3.2 ©Heino Engels Superficies sinclásticas, se observa la dirección de la curvatura y su conformación

Con esta idea, lo importante es definir una generatriz y una directriz de una estructura dada. Como ejemplos para entender este ejercicio, se han mencionado que se tratan de

cascarones de concreto, desde una lámina curva hasta paraboloides e hiperboloides. Por ejemplo, el desarrollo de un arco sobre una línea recta genera una bóveda, pero también se puede interpretar a otro tipo de estructuras que pueden definir un “espacio contenido” pues el simple desplazamiento ya sea de una recta o de un trazo. (Ilustración 17)

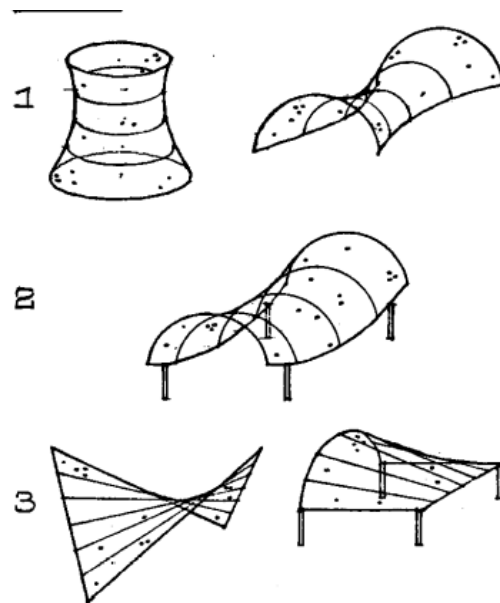


Ilustración 17: 4.3.2 ©Heino Engels Superficies anticlásticas, donde se aprecia la doble curvatura y su dirección opuesta entre estas

Como se puede ver en las ilustraciones, se tratan de rectas, mismas que giran sobre una generatriz (y es por este desarrollo que también se les denomina

<sup>42</sup> Ibid

superficies regladas), un comportamiento que le da esa apariencia de tener una superficie curva, en México tuvo una larga tradición, la ejecución de este tipo de estructuras teniendo como principal exponente al arquitecto Félix Candela Outeriño. Para concebir o construir una cubierta como parte de la estructura o el diseño de la cimbra se enuncian a continuación dos ejemplos documentados donde se aplica lo mencionado con anterioridad para obtener la forma.

Un proceso poco utilizado por su manejo del diseño , consiste en recurrir a hacer un relieve según la cubierta que se desea, a partir de ella colocar el entramado según el entramado seleccionado y así definir la cubierta, un ejemplo clásico es el aeropuerto del TWA del arquitecto Eero Saarinen, donde genera una superficie a la cual después genera un plano topográfico para plasmar dicha superficie y demás planos auxiliares pues su cubierta en realidad es más una escultura que un desarrollo geométrico a través de una recta trasladándose en una generatriz,

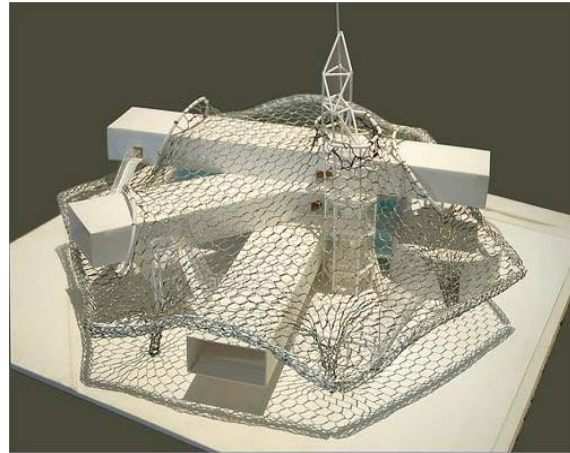
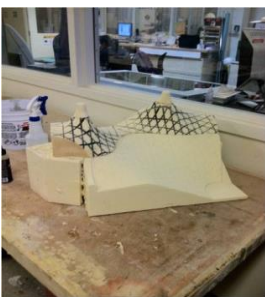
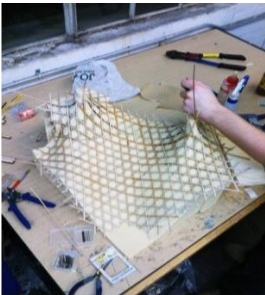
como se ha expuesto en el párrafo anterior. Para trabajar lo que se comentó de la superficie a base de una cubierta alabeada, cito el trabajo realizado por el arquitecto Shigeru Ban para el Centre Pompidou-Metz.

Como si se tratara de una maqueta funicular, se genera un terreno tomando a los puntos de apoyo formando la superficie, ya sea como Gaudí o Isler lo realizan, mientras que los elementos de madera de esta superficie se adaptan a la superficie, con un entramado basado en la estrella de David.

caso contrario a la obra citada de Toyo Ito, donde se antepone una red que sirve para definir la forma de cada pieza de madera, lo cual no afecta en nada el funcionamiento estructural siempre y cuando la forma seleccionada esté basada en las maquetas funiculares (**Ilustración 18**).

Esta propuesta utiliza dos recursos geométricos en su diseño. La primera es la que hemos abordado en este apartado, acerca de una superficie alabeada y su desarrollo para la

obtención de la forma a través de una maqueta funicular, para ubicar y darle dimensiones a cada una de las líneas que permiten su definición.



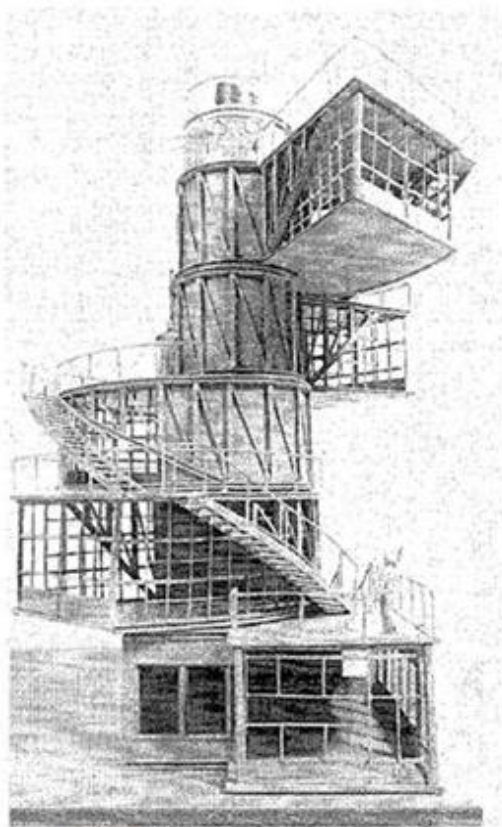
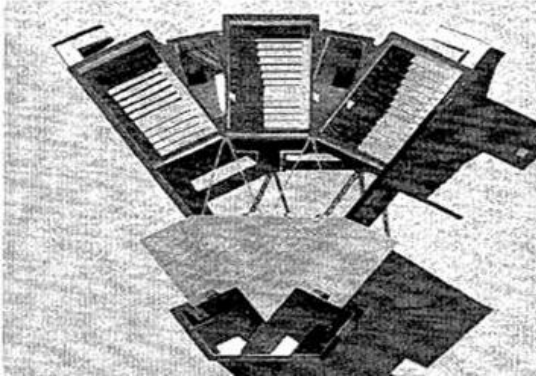
**Ilustración 18:** © Mikhail Grinwald and Karen Chi Lin, Project Report – Centre Pompidou-Metz (2010). **Desarrollo de superficie para definir el envolvente de un objeto arquitectónico.** A través de una forma previamente concebida, se realiza la colocación de un entramado sobre la superficie, la cual se deforma para obtener esta superficie, permitiendo definir qué a través de la geometría, la sección y desarrollo que tomara no solo el envolvente sino cada una de las barras que conforman la cubierta.

Por otro lado, el arquitecto Shigeru Ban, recurre a dos aspectos formales de la escuela del constructivismo rus: la *macla* y la *superposición*<sup>43</sup>. A manera de ejemplo y comparación mencionaremos los trabajos del arquitecto Konstantine S. Melnikov, quien realiza una propuesta para el periódico Leningradskaya Pravda y el club Rusakov, en estos ejemplos podemos notar la influencia de las composiciones deconstructivistas que

---

<sup>43</sup> Esteban medina E. Hernández Pezzi E. directora, Forma Y Composición En La Arquitectura Deconstructivista, Universidad politécnica de Madrid, 2003,

en la actualidad son muy recurrentes, siendo esta obra una interpretación formal de varios conceptos que se integran entre sí (**Ilustración 19**).



Konstantin Melnikov Periódico Leningradskaya Pravda

**Ilustración 19: Konstantin Melnikov a) Club Rusakov b) Periódico Leningradskaya Pravda © Dr. Arq. VICENTE ESTEBAN MEDINA**

Dicha cubierta, del Centre Pompidou-Metz, se encuentra trazado en planta el desplazamiento en tres sentidos de las barras que forman la cubierta en forma de la estrella de David, pero el relieve seleccionado genera una superficie que se enfatiza por la selección de estas vigas que reflejan un capricho inexistente pues la forma está bien en base a una retícula y por ello se han realizado propuestas para tal superficies interpretando dicha obra, asimilando que está cubierta puede tener un desarrollo irregular pero con un entramado regular que facilita la construcción de la cubierta, siendo el principio con el cual se replicó la estructura, bajo criterios similares.

### I.II.5 CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE FORMA ACTIVA

La clasificación de este tipo de estructuras es complicada pues influye, principalmente material y sistema constructivo, por lo que se ofrece una clasificación según su procedimiento constructivo, a manera de facilitar este apartado:

1.

#### ESTRUCTURAS NEUMÁTICAS

estructuras de baja presión

estructuras de alta presión

2.

#### ESTRUCTURAS LAMINARES

ferrocemento

cascarones de doble o simple

curvatura

estructuras plegadas

### I.II.6 LAS ESTRUCTURAS NEUMÁTICAS

A pesar de que estas estructuras son difíciles de manejar en el contexto del ejercicio, queda un antecedente en este trabajo para que sea considerado según capacidades técnicas y económicas para ejecutar estos ejercicios.

Las estructuras neumáticas mantienen su forma por el aire que se aplica, habiendo dos métodos para su construcción: baja presión, es decir, con aplicación de aire a una membrana simple; mientras que, en las de alta presión han requerido de doble membrana, generando una estructura que puede independizar del área que cubren, pues forman celdas o una doble capa que mantiene el aire, mientras que la estructura de baja presión se adhiere al suelo con hermetismo para formar la estructura.

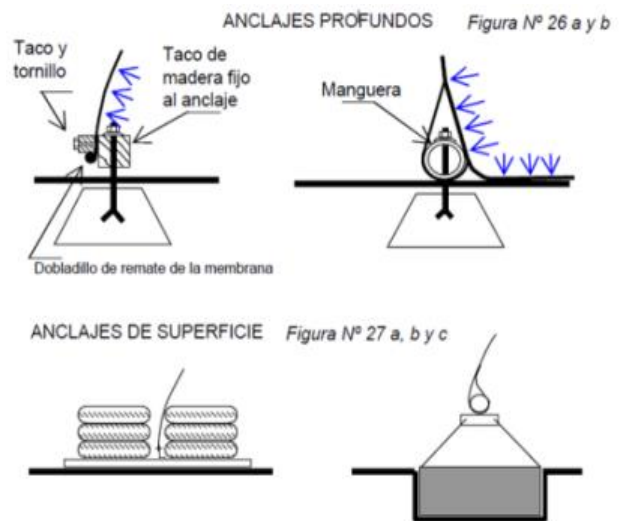
La magnitud de la presión diferencial existente entre los medios internos y externos separados por la membrana permite su clasificación en **sistemas de alta y baja presión**. En los sistemas de baja presión las

membranas se encuentran tesada por una presión normal de 10 a 100 kg/m<sup>2</sup> (0,001 a 0,01 kg/cm<sup>2</sup>) y son utilizados para cubrir un espacio habitable por resultar dicha presión diferencial fisiológicamente inocua.

En los sistemas de alta presión, la presión diferencial asciende a valores comprendidos entre 2.000 y 70.000 kg/m<sup>2</sup> (0.2 a 7 kg/cm<sup>2</sup>). Estos sistemas están constituidos generalmente mediante elementos tubulares (de ahí su nombre de estructuras tubo) que solo o convenientemente combinados pueden cumplir las funciones portantes de una viga, arco, una grilla, etc.<sup>44</sup>

Como cualidades propias a este sistema se requiere de un tesado para permitir que estas estructuras soporten cargas sobre su superficie, el tesado es una estructura que refuerza

la superficie mientras que en la imagen se una un elemento existente para para dar forma a la membrana. También se requerirá de un lastre (Ilustración 20), pues estas al ser ligeras y muchas veces se demanda que sean desmontables, se recurre a que estas sean simplemente apoyadas.



**Ilustración 20** Tipo de anclaje de estructuras neumáticas

<sup>44</sup> guía de estudio 8: estructuras neumáticas: <http://www.google.com.mx/url?Sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0cbsqfjaa&url=http%3a%2f%2fwww.tallerdnc.com.ar%2findex.php%2fplan-v%2fnivel-iv%2fdescargas%2fcategory%2f29-guias-estudio.html%3fdownload%3d360%253aguia-de-estudio-nro-8-estructuras-neumaticas&ei=rsajvldzdkm68qhonicidq&usg=afqjcnfyk vf0mkxqp2rgb8xiheetl4vylw&sig2=ds8vepq1nnwgcvs0l chz5a&bvm=bv.76247554,d.b2u>

### I.II.6.1 FERROCEMENTO

El ferrocemento, una estructura armada con un aplanado de mortero, un mortero lanzado que es atrapado por la malla que se coloca sobre el armado. Debido a esto se prescinde de la cimbra<sup>45</sup> y por lo tanto genera esto un ahorro en la ejecución de dichas estructuras (A diferencia de los cascarones, las estructuras plegadas o las losas macizas). Es debido a esta ventaja económica que continúa existiendo, cosa que al menos con los cascarones no ocurre, los cuales prácticamente han caído en desuso desde los años ochenta, otros factores como la mano de obra, han hecho de los cascarones, estructuras demasiado costosas a diferencia de otros sistemas de cubrición.

Aparecen en el primer cuarto del siglo veinte en Alemania y Rusia silos hechos con esta técnica, ya después Franz Dischinger **(Ilustración 21)**

construye un planetario dejando las estructuras no habitacionales para ser utilizados eficientemente en proyectos de equipamiento que requerían de grandes claros. Las formas que estas estructuras de ferrocemento pueden tomar son muy variadas.

La cúpula, en términos geométricos se puede entender como la rotación de un arco; si dejamos de pensar que el arco es una línea y suponemos que es material con dicha forma, como por ejemplo la varilla, la sustituimos a la línea por este acero de refuerzo y con ello construiremos nuestra la cúpula.

---

<sup>45</sup> Entiéndase como cimbra a la estructura falsa o provisional que sirve para moldear el concreto armado, es muy útil en estructuras ortogonales pues la madera que confina al concreto se habilita con mayor facilidad. Convirtiendo a los cascarones una odisea compleja de construir.



**Ilustración 21:** Uno de las primeras estructuras a base de ferrocemento: Zeiss Planetarium, Franz Dischinger. Arriba: Vista de la cúpula. Abajo: Maestros de obra trabajando en el armado de la cúpula, puede observarse la red que la varilla genera para tomar la forma indicada.

A este entendimiento geométrico-constructivo le denominaremos superficie reglada: donde la formación de una superficie se debe al

desplazamiento de una línea y es gracias a este entendimiento que los cascarones y el ferrocemento se pueden construir sin importar la forma. Como último paso será la aplicación de un mortero en la superficie para construir nuestra estructura sin necesidad de incluir madera para sostener nuestro mortero.

Otro ejemplo: si una recta se mueve siguiendo una circunferencia situada en un plano perpendicular, genera la superficie de un cilindro, que es una superficie reglada. Igualmente lo sería un cono o, naturalmente un plano, pero el interés de las superficies regladas no reside en estas superficies sencillas, sino en las superficies regladas alabeadas, es decir, las superficies que tienen doble curvatura, o, dicho de otro modo, las superficies en las que un plano tangente también es secante y la intersección entre el plano y la superficie es justamente la recta o las rectas generatrices de la misma superficie. Esto se entiende mejor en la construcción que en la geometría pues es gracias a esta idea presentada por Eduardo Torroja que



las superficies no desarrollables pueden construirse a través de la geometría

En el caso del ferrocemento, las líneas que dibujan estas formas no representan las rectas de la cimbra y la varilla sino solamente la varilla. Se lo realiza inyectando o azotando con mortero cementicio la trama metálica, previamente configurada. Los agujeros de la misma son del orden de los 10 mm. La armadura altamente subdividida y distribuida en la masa del mortero, permite disminuir de forma notable las dimensiones de las secciones transversales de los elementos, hasta 10 a 15 mm. Como resultado, el peso propio de las estructuras y el volumen de los materiales se reducen sustancialmente en comparación con las estructuras de hormigón armado.<sup>46</sup>

Con este mismo procedimiento se han realizado estructuras similares por con otros materiales, como lo haría el

arquitecto Senosiain en su casa “la ballena mexicana” la cual requirió de una cimbra neumática hecha con la forma final definida en el proyecto. Se crea el “globo”, con la forma que tomará nuestra estructura y al final se recubre con el material que en este caso es poliuretano esreado, rociándose en capas hasta obtener la rigidez necesaria para dejar de aplicar el aire a nuestra estructura neumática, pasando así de una estructura efímera hecha de lona a una estructura permanente totalmente autosoportante. “La casa combina el empleo del poliuretano esreado sobre una estructura neumática, conformando un sistema constructivo parecido al del papel maché. Sobre un firme armado, se ancla a lo largo del perímetro la neumática para poder proceder a su inflado, una vez alcanzada la presión correcta se esprea el poliuretano y se desinfla el globo, que puede volver a utilizarse en su papel de cimbra temporal.”<sup>47</sup> **(Ilustración 22).**

---

<sup>46</sup> Ferrocemento. Un material apropiado a nuestro medio, Saleme H., Comoglio S. y Méndez Muñoz J., <https://www.yumpu.com/es/document/view/14355435/ferrocemento-un-material-apropiado-a-nuestro-medio>

---

<sup>47</sup> Javier Senosiain Arquitectura Orgánica, Derechos de Autor © 2021, Arq. Javier Senosiain, <https://www.arquitecturaorganica.com/habitat-organico/ballena-mexicana.php>



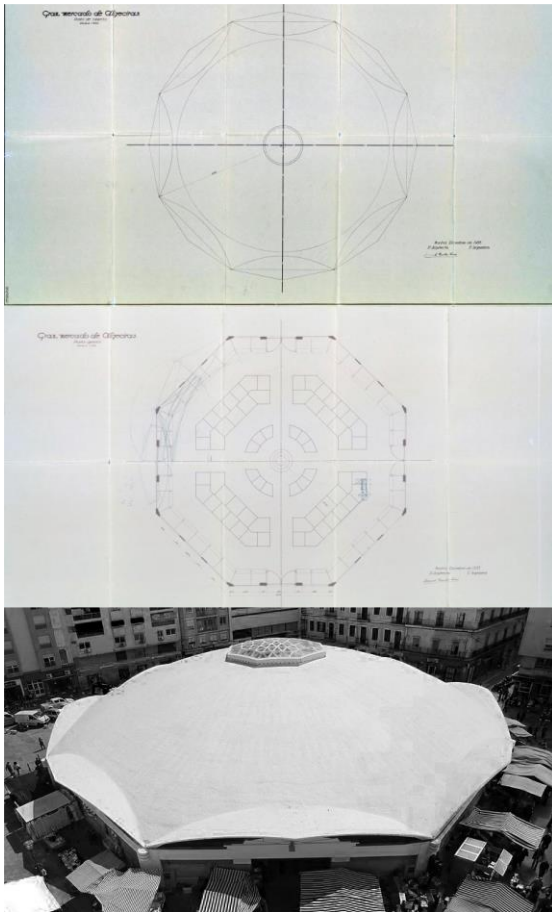
**Ilustración 22:** © Javier Senosiain Aguilar, fotos del proceso de obra del proyecto conocido como Ballena mexicana. El trabajo del arquitecto Senosiain no sólo está basado en el ferrocemento, influenciado por las estructuras de superficie activa (cascarones) también ha manejado el poliuretano espreado para sus estructuras.

### **I.II.6.1 CASCARONES CON CIMBRA (CASCARONES DE DOBLE Y SIMPLE CURVATURA)**

Este tipo de estructuras tiene una historia interesante que nace con la aparición del concreto armado y los pioneros que buscaron métodos de cimbrar elementos que tuvieran esa ligereza que caracteriza a los cascarones se cuentan principalmente con Eduardo Torroja Y Félix Candela por el concepto de superficies regladas que suponen un método para construir superficies no desarrollables con un espesor mínimo.

El trabajo de Eduardo Torroja Caballé, matemático, padre de Eduardo Torroja Miret (ingeniero) dieron como resultado una revolución en el cimbrado de las estructuras de concreto con formas como el hiperboloide y el paraboloides hiperbólico, además se introdujo con este trabajo la idea de las estructuras orgánicas como lo entendía Frank Lloyd Wright, donde la cubierta y elementos soportantes son uno sólo, comportándose entre estructura, función y estética funcionen de

manera integrada. Pretendiendo que la estructura trabajase con mayor eficiencia, caso típico y de los primeros registros es el mercado de las Algeciras, España (**Ilustración 23**).



**Ilustración 23: Plantas general; planta de cubiertas y foto panorámica del proyecto del Mercado de Algeciras de 1934. © Fundación Eduardo Torroja. Mercado de abastos de Algeciras**

Se ha mencionado con anterioridad acerca del principio que rige al mundo orgánico y es por ello por lo que al ingeniero Eduardo Torroja se le

estimaré porque "[...] ha expresado los principios de construcción orgánica mejor que cualquier otro ingeniero." Este dinamismo de la forma y la estructura, la verdad innata en sus obras y hasta cierto punto honestidad, además que ha trabajado con diferentes formas no desarrollables, merece entonces reconocerle y estudiar su trascendencia.

El periodo que siguió a la finalización de la segunda guerra mundial se caracterizó por un importante desarrollo experimental en el campo de la edificación. Dentro de él destacaron especialmente las aplicaciones del concreto armado, material sobre el que se había alcanzado un gran conocimiento en la etapa anterior, pero que no había encontrado, sin embargo, un uso suficientemente generalizado. A este respecto, van a ser precisamente las formas superficiales de tipo delgado o cáscaras las que van a suponer la principal innovación.

“Estas formas laminares ya habían sido estudiadas en su aparato matemático desde los

años 20, especialmente en el ámbito alemán, y sobre ellas quizás la más importante aportación fue la comprensión del comportamiento de membrana. Según éste, los esfuerzos en una cáscara delgada, pero suficientemente rígida, sólo serían de compresión, tracción y cortante, pero no existirían en ningún caso flexiones. Debido a esta ausencia de flexiones el espesor podría reducirse hasta unos pocos centímetros con tal de que la forma y sus apoyos cumplieran ciertas condiciones fundamentales. Naturalmente, pronto se vio que el hormigón armado, por su capacidad moldeable, sería el material más adecuado para realizar estas superficies resistentes con la inclusión en su interior de armaduras de acero para los esfuerzos de tracción y cortante. Su estudio teórico planteó en un principio, sin embargo, serias dificultades de aplicación práctica excepto para una serie de casos de

geometría sencilla y como consecuencia, serán estas formas las adoptadas por las primeras soluciones.”<sup>48</sup>

La “directriz” de la cubierta y la “generatriz” con la que se desplaza, genera una rigidez que ha permitido una gama de formas, además definieron el proceso constructivo para la cimbra, por ello podemos obtener formas únicas no desarrollables hasta ese entonces y que ahora es precisamente la falta de procedimientos económicos, donde las superficies alabeadas no sean construidas con tiras de cimbras, que han dejado de construirse, explicando a continuación a manera que quede claro el procedimiento que Félix Candela trabajaría para la ejecución de sus estructuras

---

<sup>48</sup> Actas del sexto congreso nacional de historia de la construcción, Valencia, 21-24 octubre 2009, eds. S. Huerta, R. Marín, R. Soler, A. Zaragoza. Madrid: instituto Juan de Herrera, 2009

<http://trienal.fau.ucv.ve/2008/documentos/tc/TC-18.pdf>

### I.II.7 LÁMINAS PLEGADAS

Las estructuras formadas por plegaduras de concreto armado constituyen un conjunto de formas estructurales cuya vigencia en cuanto que formas construidas tuvo una duración que apenas superó las dos décadas. En efecto, si consideramos el conjunto de sus realizaciones efectivas, éstas se aprietan mayoritariamente entre comienzo de los años cincuenta y el final de los sesenta del siglo XX. Singularmente puede certificarse su final con el congreso de la internacional Association Of Shell Structures (IASS) celebrado en Viena en 1970.

“En él se presentaron las últimas y más grandes realizaciones con este sistema (sala de conferencias de la UNESCO, en París de Nervi, Breuer y Zehrfuss y un hangar para la Alleghany Airlines en el aeropuerto Logan de Boston, salvando este último un récord de 75,86 m con una lámina plegada simple). No obstante, las esperanzas puestas en la geometría de plegaduras, en buena parte alentadas por dicho congreso,

apenas se hicieron ya obras destacables a partir de la fecha del mismo. Es llamativo, por otra parte, que aunque pueden considerarse un ciclo prácticamente cerrado apenas se han estudiado en su conjunto, existiendo muy contados trabajos al respecto.”<sup>49</sup>

Las láminas plegadas comparten similitud de los cascarones de concreto y el ferrocemento ya que se basa en la rigidez dada por los dobleces, pues por ejemplo, si pensamos en una hoja de papel, este no ofrece ninguna rigidez o resistencia a la deformación, si colocáramos algunos refuerzos horizontales (similar a una viga) esta hoja sería más rígida. Ahora bien, si plegáramos esta hoja como si fuera un acordeón, notaríamos otro tipo de rigidez, ahora lo que es un elemento estructural se vuelve en un recurso de composición<sup>50</sup>.

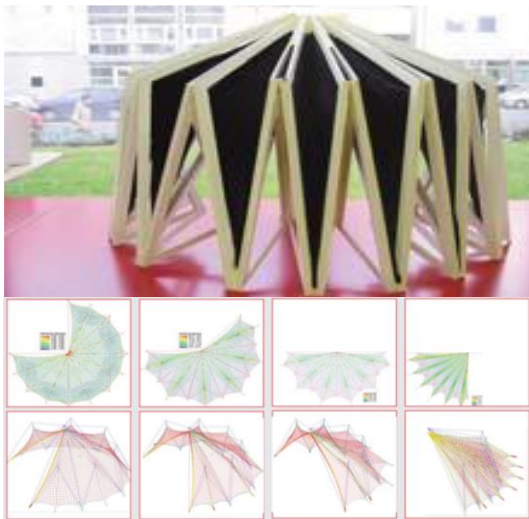
---

<sup>49</sup> Láminas plegadas de hormigón armado. Realizaciones en España  
[http://oa.upm.es/14931/1/pdf\\_plegadas\\_espa%20a.pdf](http://oa.upm.es/14931/1/pdf_plegadas_espa%20a.pdf)

<sup>50</sup> Sin afán de profundizar con uno de los conceptos más complejos de la arquitectura, me limitaré en citar a la RAE para la definición de composición: “Formar de varias cosas una, juntándolas y colocándolas con cierto

A pesar de la simpleza de la definición de su forma no han tenido mucho impacto en la actualidad, pero hay ejemplos notables que servirán como ejemplo de su diseño como una guía para nuestros ejercicios. La capacidad de llevar a cabo estos ejercicios con herramienta básica y una cuadrilla con experiencia elemental, ha llevado a que se repliquen ejercicios de estructuras plegadas en varias universidades e instituciones privadas.

**(Ilustración 24)**



**Ilustración 24:** ©Context-T Ejercicio denominado 'deployable demonstrator' realizado por la fundación europea Contex-T., denominado también como un refugio plegable.

La complejidad de estas estructuras radica en la unión de cada una de las superficies apoyadas entre sí, donde

---

modo y orden. // tr. Dicho de varias partes: Formar o constituir un todo." <http://dle.rae.es/?id=A28RNZ3>

se hayan los dobleces de nuestra cubierta, pues es ahí donde puede haber una falla y por lo tanto requiere de un refuerzo estructural que permita su estabilidad estructural. Rafael García García cita a Candela acerca de las estructuras plegadas como aquellas que, a diferencia del resto de estructuras laminares, están "sometidas a régimen mixto de esfuerzos de membrana y flexión" [...]

La realización de superficies de este tipo no tuvo mucha notoriedad en México debido a que los cascarones basados en paraboloides hiperbólicos fueron los que acapararon la atención de los proyectistas, sin embargo he de mencionar un ejemplo interesante que arroja luz para comprender un recurso que nos servirá para diseñar una estructura que pudiera ser construida con materiales, ya sea concreto acero o madera. La iglesia de san Antonio de Padua es una iglesia realizada por los arquitectos Alberto Gonzalez Pozo, Leonardo Vilchis Platas y calculado por Juan Antonio Tonda en 1966, esta obra muestra una serie de láminas que a pesar de que se recurre a las formas de transición para definir

su forma, esta se encuentra plegada, la cual se repite. (**Ilustración 25**).



**Ilustración 25:** © Autor, fotografi.: Vista exterior del templo de San Antonio de Padua: Ritmo y modulación que además sostiene con estos dobleces, la cubierta, autores: Arq. Alberto Glez Pozo y Juan Antonio Tonda.

Para el atrio simplemente deja expuesta toda esa superficie reglada que le da forma mientras que en el ábside, los pliegues se ubican alrededor de un centro dándole dinamismo a una forma que pudo haber sido mas simple y tal vez hubiese sido menos impactante, siendo la superficie reglada la que permitió, con la misma composición de la superficie laminar, dar jerarquía, ritmo y remate bien definido, pero lo que he de rescatar para el ejercicio preparado, es que usa una forma específica, que se repite en toda la cubierta, aunque con diferente ritmo. La mayoría de ellas y sin duda las más

importantes, tuvieron su momento álgido en las décadas de los cincuenta y los sesenta del siglo XX. Singularmente, puede certificarse su final, al menos simbólico, con un destacado Congreso de la *Internacional Asociación of Shell Structures (IASS)* celebrado en 1970 y dedicado expresamente a este tipo de estructuras. Pese a las esperanzas puestas en la geometría de plegaduras, alentadas por dicho Congreso, apenas se hicieron ya obras destacables<sup>51</sup>.

Se supondría que estas estructuras son simples pues se piensa en un doblez simple (dobleces en una dirección) pero puede tener dobleces en ambos sentidos y a veces adoptar algún tipo de *origami*. Una cualidad es que la tecnología ha permitido que se realicen propuestas más intrépidas para este tipo de estructuras, como la aplicación del *origami* en el que se abordará más adelante, como en el caso mencionado de la capilla de Saint Loup (**Ilustración 26**), colaborado por la Escuela Politécnica

<sup>51</sup><http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/viewfile/2610/2922>

Federal de Lausana, se explica a continuación:

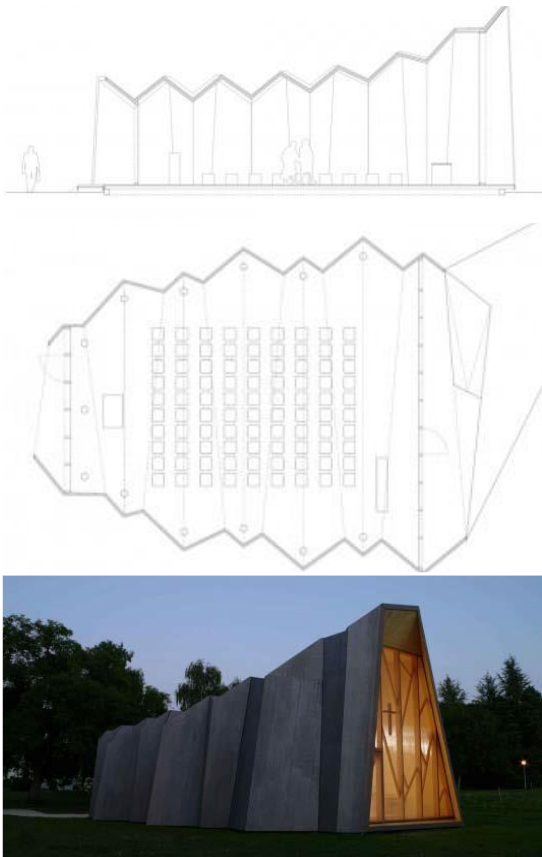


Ilustración 26: Iglesia de Saint Loup, ejemplo del manejo de un material ligero que permita esa relación formal y estructural característica de las estructuras laminares. Solución que bien pudo haber sido de concreto o acero, pero debía tener el carácter de provisional, siendo que la madera resulta más barata en estas zonas.

*“El objetivo de este proyecto es implementar sinergias profesionales y la experimentación constructiva al servicio de un lugar de comunión y transmisión de valores fundamentales. El proyecto debe reflejar la situación particular*

*de dicho programa en un entorno natural de gran calidad. El concepto para la construcción de madera, como un espacio religioso en armonía con su entorno, es el valor añadido que los diseñadores quieran aportar a este proyecto.*

*Los tableros contra laminados tienen un espesor variable: 60 mm para el techo y 40 mm para las paredes y los pisos. Estos tableros estructurales se cortan con una sierra accionada por control numérico (CNC) de acuerdo a los planos preparados por IBOIS 3D<sup>52</sup>. Cada tablero tiene un tamaño diferente. Los ensambles están asegurados con una chapa plegada de 3 mm de espesor, pero los tableros están clavados.*

*[...]Los muros piñones se estabilizan por un marco de montantes y diagonales de abeto. Los textiles para vestir la cara exterior, y los paneles de*

---

<sup>52</sup> Boletín de información técnica n° 266, asociación de investigación técnica de la industria de la madera [http://infomadera.net/uploads/articulos/archivo\\_5600\\_2660613.pdf](http://infomadera.net/uploads/articulos/archivo_5600_2660613.pdf)



*policarbonato alveolar de 10 mm para el interior.*<sup>53</sup>

En este ejemplo, se podría pensar que, debido al tamaño y el material, permiten trabajar con esta geometría, sin embargo, existen proyectos a escalas monumentales y materiales muy diferentes, lo que permite suponer que, aunque el procedimiento constructivo y los materiales cambien, la geometría puede ser rectora en el diseño, adaptando estructura a la forma.

Un caso notable es también la sala de conferencias de la UNESCO, la cual no solo los elementos plegados de concreto son evidentes en esta estructura, pues se observa que esta estructura se deforma para resistir los momentos que deformarían la estructura. **(Ilustración 27).**

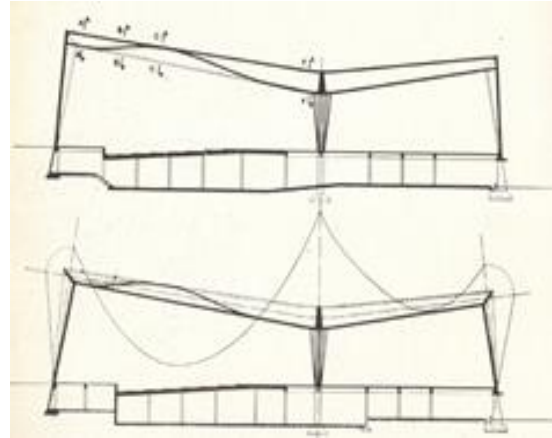


Ilustración 27: la estructura plegada del auditorio de la sede de la UNESCO en Francia, es testigo de una solución factible para este tipo de estructuras, basándose en su diseño, como se demuestra en la ilustración, en responder a los momentos últimos.

“Se trata de un conjunto formado básicamente por dos edificios y las construcciones anexas y de conexión entre ellos. El edificio del secretariado es un bloque de forma de “y” en planta, con siete pisos levantados sobre pilotes. El de la sala de asambleas tiene una planta en forma de trapecio; su estructura portante está resuelta a base de muros sobre los que se apoya la cubierta de hormigón armado. Tanto los muros como la cubierta son ciegos [...] y son en forma de lámina plegada para aumentar la estabilidad y reducir el

---

<sup>53</sup> Ibid

espesor que requieren las grandes luces.”<sup>54</sup> (Ilustración 28)



Ilustración 28: la estructura plegada del auditorio de la sede de la UNESCO en Francia, es testigo de una solución factible para este tipo de estructuras, basándose en su diseño, como se demuestra en la ilustración, en responder a los momentos últimos.

Es precisamente a los ejemplos aquí presentados que podemos dejar claro que, más allá de la logística, el procedimiento constructivo según estructura y escala, la geometría se impone para ejecutar cualquiera de los ejemplos aquí presentados. Ahora bien, es indispensable manejar las herramientas auxiliares en el diseño de estas estructuras basadas en la geometría, escala, etc. Sirviéndose de los ejercicios aquí presentados.

---

<sup>54</sup> Crespo Cabillo, I. Control gráfico de formas y superficies de transición. Pp. 99

## I.II.8 ESTRUCTURAS DE VECTOR ACTIVO

Este tipo de estructuras están basadas en la idea básica de que el comportamiento estructural está regido por la compresión o tensión de cada barra, según sea la ubicación de estas que forman la estructura, debido a que estas, basadas en triángulos y siendo que cada elemento que lo constituyen tan cortos que se puede despreciar la flexión a menos que alguna carga puntual defina lo contrario.

Es de vector activo pues el método para su cálculo consiste interpretación de las fuerzas las cuales se consideran como magnitudes vectoriales.

Considerando el sistema constructivo y añadiendo a la clasificación un elemento extra que se explicará más adelante, nos basamos en clasificación de Heino Engels para definir los diferentes tipos de estructuras de vector activo, enunciando cuatro tipos de estructuras más una estrechamente ligada a este trabajo:

1. Armaduras planas
2. Armaduras curvas
3. combinadas
4. Estructuras espaciales
5. Estructuras arborescentes

Son estructuras que basan su comportamiento a elementos lineales, para elaborar los elementos portantes se requieren de “barras” que se unan entre si usando como base el triángulo que, repitiendo uno tras otro configuran un espacio.

Estas barras se comportarán estructuralmente como un esqueleto, a diferencia de la superficie activa que es la “membrana” o la superficie generada la que soporta las cargas, en este caso este esqueleto soporta lo que serán los elementos de cierre, o sea los elementos que limiten en definitiva el espacio. Consisten en una serie de barras que se van uniendo en sus nodos, relativamente cortas de tal manera que se desprecia el pandeo de las barras<sup>55</sup> en este tipo de sistemas estructurales.

---

<sup>55</sup> Como ocurre con las columnas y vigas, mientras más largas sean estas, tienden a deformarse con mayor

“las barras traccionadas o comprimidas unidas de manera que formen un triángulo forman una unidad estable que, si se *sustentan* adecuadamente, puede transmitir diferentes cargas, incluso asimétricas a los extremos”<sup>56</sup>

Un ejemplo que pudiera explicar este tipo sistema es la estación de metro chabacano de la línea 2 del sistema de transporte colectivo metro de la Ciudad de México. El cual consiste en esta disposición de triángulos que generan la estructura de la cubierta y es a través de esa modulación que se construyen los elementos portantes.

Podemos ver en este ejemplo los elementos complementarios para delimitar el espacio con muros y los accesorios de lámina para cubrir la estructura a base de estas “barras”, se puede apreciar que la columna, en vez de ser un paralelepípedo, los

---

facilidad. Este fenómeno es causado por la flexión, un par de fuerzas (paralelas, pero en sentido contrario una de la otra) que actúan dentro de dichas piezas: mientras de un lado las fuerzas comprimen, en el sentido opuesto de la viga o la columna dichas fuerzas la tensan, generando una deformación.

<sup>56</sup> Heino Engel. Sistemas de estructuras. Editorial Gustavo Gili s.l. Barcelona, 2006. 1ª edición

diseñadores recurrieron a un prisma de base cuadrada, para así mantener el mismo módulo que se usó para la cubierta, aunque las barras que delimitan este prisma se notan con un refuerzo extra, para evitar fallas por aplastamiento, fenómeno común en columnas.

Para la elaboración de estas maquetas se valió de la generación de un “esqueleto” a base de barras unidas entre sí formando triangulaciones, los cuales definirán una cubierta y la delimitación del espacio. Para tal ejercicio se valdrán principalmente de las estructuras espaciales y las estructuras arborescentes, siendo las estructuras más dinámicas de este conjunto. Consistirá entonces en la generación de un módulo y repetirlo hasta crear la estructura deseada.

Es un ejercicio que, en vez de reflexionar la sección de cada una de las barras de la estructura, será la disposición del módulo y geometría de cada elemento, rectores de este ejercicio. En otro ejemplo se realizaron modelos similares a un “árbol”, donde

varias barras se apoyan sobre una de sección mayor y estas unidas a otras de su misma sección descansarán sobre otra que, al final serán recibidos por un perfil principal que, estructuralmente se comporta como la tronco.

Así como las maquetas funiculares sirven para tener la idea de la forma y la estructura, estas maquetas también anteponen la geometría a la estructura, pues en el cálculo estructural de este tipo de estructuras, difícilmente alteran la geometría o las dimensiones de cada barra, pues su forma triangular presenta grandes beneficios, así como la longitud “corta” de cada barra que conforma la triangulación. Por lo tanto, trabajar la triangulación y sus derivaciones formales son los únicos requisitos para explorar diferentes soluciones formales.

Gracias a que estas estructuras se analizan bajo el método de descomposición de fuerzas, no resulta muy complicado para analizar su comportamiento. A pesar de que muchos suponen que se trata de una viga y columnas de alma abierta.

### I.II.9 ARMADURAS PLANAS Y CURVAS

Proporciona soluciones que resultan ser tanto prácticas como económicas a muchos problemas principalmente en el diseño de puentes y edificios. Una armadura consta de elementos rectos conectados en los nodos, por diagonales formando elementos triangulares, siendo por esto muy estables, evitando longitudes largas que generen pandeos en cada uno de sus elementos. Cada armadura se diseña para soportar cargas que ejercen fuerza en su propio plano, por lo que se comportan como las vigas, pero la triangulación con nulo o despreciable flexión las convierte en estructuras muy estables y adjudica la ligereza al acero y la madera, permitiendo el habilitado de estas estructuras con relativa factibilidad.

Las armaduras curvas suelen construirse con una sola curvatura como la “IBM Travelling Pavillion”<sup>57</sup>

---

<sup>57</sup> Pabellón itinerante de la empresa IBM para mostrar por toda Europa los avances tecnológicos en telecomunicaciones e informática, diseñada por Renzo Piano en 1983. Una cualidad de este tipo de estructuras, así como la estructura mencionada del

(ilustración 29), pues las cerchas de doble curvatura tienen mayor complejidad y costo. Comúnmente construidos con curvatura en un solo sentido, y sólo como una cubierta ligera y desmontable.

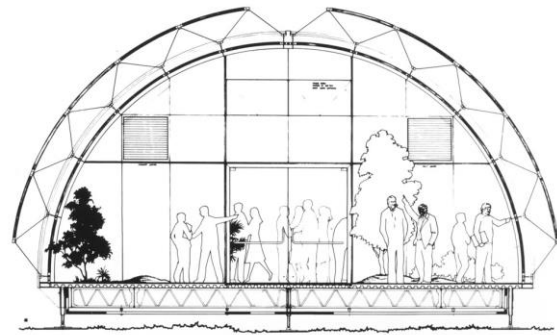


Ilustración 29: © arq. Martín Lisnovsky, Pabellón itinerante diseñado por el arquitecto Renzo Piano, alzado (arriba) y corte (abajo)  
<http://arquitecturamashistoria.blogspot.com/2007/11/delicias-renzo-piano-y-el-pabelln.html>

---

metro chabacano, es que se pueden desmontar y montar. Otra de sus ventajas es que estos perfiles son ligeros y su construcción se puede sistematizar.

## I.II.10 ESTRUCTURAS ESPACIALES

*“Sin duda una de las personalidades determinantes en el desarrollo de las tipologías de mallas espaciales fue el estadounidense Richard Buckminster Fuller (1895-1981). Son destacables sus trabajos sobre la generación de poliedros a partir del macizado del espacio con esferas y la triangulación geodésica de la superficie esférica. Una de sus propuestas fue el edificio “Ford Rotunda”, construido en el año 1953, donde aplicó el sistema “Octet Truss”.*

*En lo que respecta al desarrollo de los sistemas constructivos las investigaciones se han centrado en el diseño del elemento primordial en las mallas: el nudo de enlace. En el año 1940, Konrad Wachsmann [I-63] sistematiza las geometrías espaciales desarrollando un conector universal que permite a cada nudo recibir hasta 20 barras tubulares; Menherinhausen patenta en 1945 el sistema MERO [I-64] (**Ilustración 30**) de mallas espaciales, probablemente el nudo más conocido y también el más*

*copiado, lo que demuestra sin duda su acertado diseño.*<sup>58</sup>

Los nodos serán un tema recurrente, siempre en busca de estandarizados ni patentados y que se aproxime a las soluciones regionales que en ocasiones el presupuesto y el difícil acceso a algunas tecnologías impide usar nodos comerciales y así buscar tanto la optimización de la materia prima para hacer las barras de las estructuras espaciales y abaratar los costes utilizando nodos de bajo costo y reproducibles en cualquier taller básico. Estructuras o mallas espaciales, se basan en triangulaciones.

---

<sup>58</sup> Vázquez Rodríguez, J. A.; Las barras huecas de madera en la construcción de estructuras espaciales. [https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiUwpXHysjLAhUH1SYKHTmhCE8QFggBMAA&url=http%3A%2F%2Fruc.udc.es%2Fdspace%2Fbitstream%2F2183%2F1051%2F3%2FVazquezRodriguez\\_Pepe\\_TD\\_2001.pdf&usg=AFQjCNGcqTHA5FsEzKpV2HQdRkmXIscNCg](https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiUwpXHysjLAhUH1SYKHTmhCE8QFggBMAA&url=http%3A%2F%2Fruc.udc.es%2Fdspace%2Fbitstream%2F2183%2F1051%2F3%2FVazquezRodriguez_Pepe_TD_2001.pdf&usg=AFQjCNGcqTHA5FsEzKpV2HQdRkmXIscNCg)

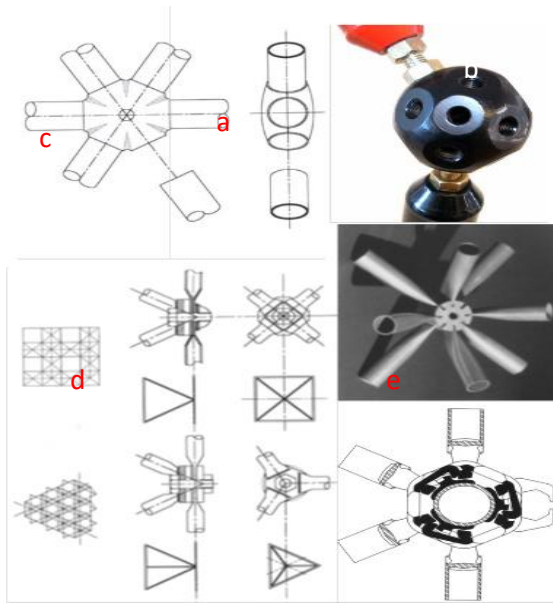


Ilustración 30: © José Antonio Vázquez Rodríguez, Imágenes ilustrativas: Nodos en estructuras espaciales, esenciales para su estandarización que facilite el montaje y abarate costos; a) sistema MERO de Menherinhausen b) nodo de aluminio de Fentiman Bross c) Konrad d) sistema Tridirectionelle de Stéphane du Chateauü utilizado en el sistema Piramitec (e)

Su geometría a barras unidas formando triangulaciones. Las armaduras se les denominan también como cerchas, las cuales la cuerda superior forma un triángulo con la diagonal que une cuerda superior e inferior de la armadura y vigas de alma abierta o joist, las cuales, la cuerda inferior y la cuerda superior forman dos rectas paralelas, con el manejo de la triangulación de la diagonal, aun así tienen algo en común: son bidimensionales), mientras que las estructuras espaciales son estructuras

basadas en la triangulación pero en ambos sentidos de la losa, formando una envolvente a través de esta estructura.

En el caso de las cerchas son elementos individuales portantes auxiliadas de contraventeos que no hacen más que recibir la cubierta, mientras que las estructuras espaciales forma un elemento constante en toda la cubierta creando un membrana de barras, las cuales se han utilizado de entrepiso como de cubierta, estas estructuras, parecen tener una constante con el resto de los tipos de vigas de esta subdivisión de estructuras, siendo muy versátiles en la obra pues se apoyan en elementos de concretos en marcos rígidos o puedes crear una superficie a través de las estructuras espaciales y cerchas curvas. Una diferencia entre estas dos es que las primeras mantienen la triangulación y tomar una superficie curva mientras que las cerchas son una serie de barras.

### I.II.11 ESTRUCTURAS ARBORESCENTES

Las estructuras de vector activo son fáciles de entender, cómo una viga de alma abierta, pero hay una en la que nos enfocaremos por la diversidad de sus soluciones. Las estructuras arborescentes conocidas así por su similitud a la ramificación de un árbol, es un comportamiento estructural que se reproduce fácilmente pero que sigue un principio básico analizado por Frei Otto:

“Una estructura intermedia entre una estructura con pocos puntos de aplicación de fuerzas e infinitos puntos tendría que ramificar o bifurcar sus elementos hasta conducir los esfuerzos a los apoyos y por tanto tendría una forma de árbol, que recibe las cargas de varios puntos en la cubierta y los conduce a un número menor de puntos, es decir los apoyos.”<sup>59</sup> **(Ilustración 31)**

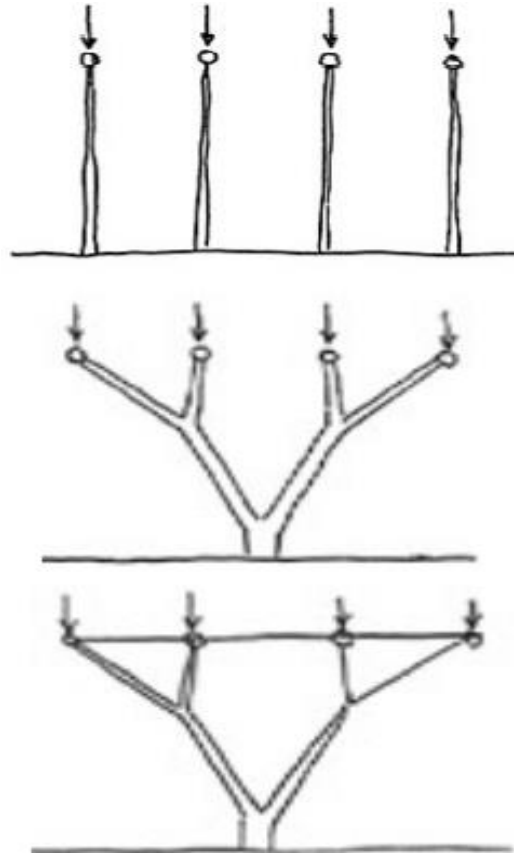


Ilustración 31: © Llorens J. croquis explicando una interpretación del comportamiento de las estructuras arborescentes. <https://vdocument.in/structuri-textile.html> . Mientras más nodos haya puntos de aplicación en la conexión de un apoyo, dando estabilidad, esbeltez y mayor eficiencia en el apoyo, inversamente a este fenómeno están los marcos rígidos que recurren a la rigidez por la sección es están requieren, así como refuerzo

Este sistema funciona reduciendo el claro colocando apoyos que aumenten los nodos que reciben la carga de la superficie de una cubierta y que se dirigen hacia un apoyo como el comportamiento propio de un árbol, con esto la cubierta aumenta su rigidez y desaparece la flexión que es la finalidad de este tipo de estructuras

<sup>59</sup> La esencia del árbol / Marcel Antonio Maury Montenegro. -- Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Artes



y que le permite tener la propiedad de ser más ligera. “Sistema jerarquizado de transmisión de cargas verticales, que tiene como objetivo recibir y transmitir de la cubierta los esfuerzos a partir de varios y repartidos puntos de aplicación de fuerzas a un menor número de puntos fijos (los apoyos en el suelo), por medio de la ramificación de sus elementos portantes en puntos llamados nudos, buscando reducir la flexión y la longitud de pandeo.”<sup>60</sup>

El sistema estructural utilizado para la simulación de bosque es el reticulado espacial, funciona a dos esfuerzos básicos: tracción y compresión. A través del uso de barras cortas permite transmitir las cargas de la cubierta a unos pilares o troncos muy distanciados entre sí, funcionando tridimensionalmente. Los detalles constructivos de las edificaciones basadas en esta configuración ratifican la idea de que la cubierta flota sobre los árboles y permite el paso de luz natural controlada, evidenciando la idea de “liviano pero firme” que se perciben dentro de un bosque. Estas estructuras continúan con la premisa

de la distribución de las fuerzas a través de la triangulación, pero en un elemento tridimensional. Con estructuras sumamente interesantes, que consisten en una cubierta que va llevando a base de estas “barras” las cargas a través de estos elementos en forma de triangulación hacia un apoyo, siendo parecido al comportamiento estructural de un árbol; donde los elementos estructurales superiores tienen menor carga y por lo tanto es lo más ligero que las presiones que le afectan se lo permitan.

Un ejemplo de este tipo de estructuras es la terminal 3 del aeropuerto internacional de Stuttgart, se disponen una retícula, que se puede observar en la cubierta que servirá para emplazar cada elemento estructural, mientras en un punto se unen y son sostenidos por otras barras que a su vez se unen en un siguiente punto hasta unirse en una sola base (**Ilustración 32**).

---

<sup>60</sup> ibid



Ilustración 32: © Marcel Antonio Maury, Ilustración de la columna del Aeropuerto Internacional de Stuttgart, T3. Un ejemplo de estructura arborescente, el cual se comporta formal y estructuralmente como un árbol, procurando ligereza y levedad salvando claros considerables.

Mientras la carga es transmitida a otros elementos del árbol, estos comienzan a tener una mayor sección

hasta que el poste que recibe toda la estructura tiene una sección mayor, como si se tratara de un tronco<sup>61</sup>. Si estas estructuras se clasifican dentro de las estructuras de vector activo es porque la longitud de las barras que la componen son cortas, lo que permite “despreciar” el pandeo de cada barra y por lo tanto calcular por la descomposición de vectores. No así cuando las barras aumentan su longitud, pues estos ocasionarán la aparición de flexión ocasionando deformaciones y por lo tanto las piezas deberán reforzarse o aumentar su sección, pero si se cuida esta nueva condición y se mantiene la interpretación de que se trata de un árbol esta estructura mantendrá tanto la estética como su función estructural

---

<sup>61</sup> Recordemos que las estructuras de marco rígido (sección activa), al actuar en contra de la naturaleza, requieren de mayor refuerzo para reducir la flecha y otros fenómenos causados, por ejemplo con el sismo, el cual se maximiza las vibraciones al aumentar la altura del edificio y por lo tanto es difícil reducir la sección de columnas y trabes pues, además que las vibraciones aumentan, reducir las secciones de estas vuelven vulnerable a esas vibraciones pues se vuelven esbeltas, fenómeno que se contrarresta en las estructuras arborescentes por la ya repetida triangulación en la que trabajan los nodos. En marcos rígidos auxiliados del contraventeo y otros elementos que absorben las vibraciones reducen este fenómeno de manera considerable.

como sucede en el Museo De Ciencias Del Príncipe Felipe<sup>62</sup>

En este ejemplo cada barra mantiene la esbeltez necesaria pues continúa con esta unión entre nodos como si se tratara de un árbol y las secciones se mantienen de tal manera que continúa evocando a una estructura arbórea tanto formal como estructuralmente.

Un ejercicio que tal vez sólo en concreto se podría ejecutar con la maestría con la que se ejecutó la obra, por el cambio de secciones en un mismo elemento, aunque no por ello fácil de construir. Por lo tanto, los elementos de mayor carga serán de una mayor sección al resto de la estructura arborescente, serán las columnas que reciben todo el peso de la cubierta y en base a esta consideración estructural y formalmente se comporta como un árbol. **(Ilustración 33).**

A diferencia de las estructuras de superficie activa que está basada en su mayoría al concreto armado, así

como los ejemplos más representativos de este tipo y difundidos en el mundo, las estructuras arborescentes se han construido en igual proporción tanto en concreto como acero. A diferencia de que el concreto, por tratarse de un material más pesado por la naturaleza, hace difícil observar la ligereza que se pretende a estas estructuras como en el caso del acero y por lo tanto el comportamiento que mimetiza o hace la analogía no solo formal además estructural de un árbol. En el caso del concreto habría que revisar si a pesar de la triangulación existe la flexión y la flexo compresión, que es lo más probable por el peso considerable de las secciones de concreto, haciendo difícil su viabilidad, pues el límite de fluencia del acero misceláneo permite ser más ligero y al momento de ser revisadas en el cálculo, desprecias ya sea excentricidades y la flexión, mientras que en el concreto, una estructura en sí más pesada, con menor resistencia a la compresión, aunque apoyado por el acero de, la esbeltez de una pieza es difícil de manejar, se requerirá entonces de una sección mayor para soportar ese

---

<sup>62</sup> Ciudad de las Artes y las Ciencias, Av. del Profesor López Piñero, 7, , Valencia, España

peso que afecta hasta la cimentación afectando el costo-beneficio, algo que en el acero es más fácil pues es más ligero y por lo tanto se adhiere mejor a la analogía del árbol

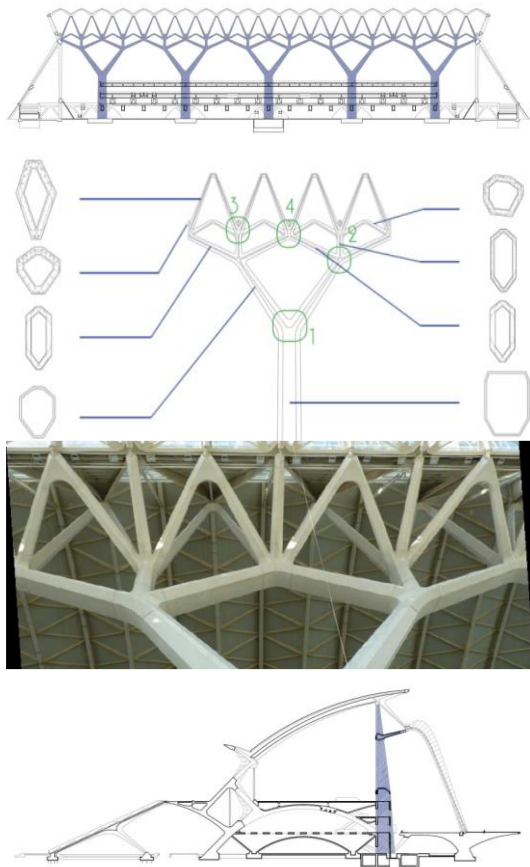


Ilustración 33: © Ángel Pascual Carrión Piles. Croquis y fotografía de El museo de ciencias del príncipe Felipe. Arriba: secciones y alzado de la estructura. Abajo Imagen de un detalle de la cubierta. Derecha: Detalle de los diferentes nodos para unir las barras de concreto. Obra realizada por el ingeniero Santiago Calatrava.

En los marcos rígidos, es más difícil reducir la sección de un elemento estructural, a pesar de que las columnas de niveles superiores de un edificio soportan menos carga que las

columnas de la planta del primer nivel, es sabido que el sismo, al ser considerada como un momento aplicado en cada nodo, donde el punto de apoyo es el suelo y va en aumento mientras la altura es mayor y reducir la sección de la columna causa un inconveniente: la reducción de la rigidez hacia las vibraciones del sismo que en las plantas superiores es mayor que en planta baja o el primer nivel. Pero la estabilidad que se da en las estructuras con nodos a base de triangulaciones como las que se han explicado permiten mantener la estabilidad que se pierde con la reducción de las secciones, demostrando la validez de las estructuras arborescentes.

En el acero por la ligereza general de la estructura, difícilmente una sección seleccionada será sustituida por otra de mayor dimensión como ocurriría con el concreto o en el mejor de los casos aumentar la sección de acero de refuerzo que se traduce a mayores problemas constructivos, aunque no es imposible, pues podemos observar que puede ser viable como ocurrió en el Museo De Ciencia Del Príncipe

Felipe, como ejemplo de construcción en base a la idea formal y estructural de árbol con la materia prima que es el concreto, pues la transición de las formas en cada elemento estructural le otorgan mayor valor plástico mientras que en el caso del Aeropuerto de Stuttgart (Stuttgart, Alemania) la idea del árbol se ve más clara y la estabilidad estructural se conjuga perfectamente con la ligereza que el acero misceláneo puede dar a estas estructuras. En el caso del concreto se podría ejecutar con la maestría clásica de nodos sobre reforzados, por el cambio de secciones en un mismo elemento, aunque no por ello fácil de construir. Por lo tanto, los elementos de mayor carga serán de una mayor sección.

## **I.II.12 ESTRUCTURAS DE SECCIÓN ACTIVA**

En este tipo de estructuras son estudiadas por su comportamiento con la flexión: la manera en que la compresión y la tensión, como dos fuerzas paralelas a la viga la deforman y le hacen sufrir una falla. Si pensamos en una viga, que tiene una longitud 30 veces mayor a las dimensiones de su sección<sup>63</sup>, se podría suponer que se deformará y por lo tanto habrá que aumentar las dimensiones de la sección de dicha viga. Es por esta deducción que define su nombre. **(Ilustración 34)**

---

<sup>63</sup> Dibujo del perfil o figura que resultaría si se cortara un terreno, edificio, máquina (o cualquier elemento estructural como vigas, columnas, cimentación etc.) por un plano, con objeto de dar a conocer su estructura o su disposición interior.

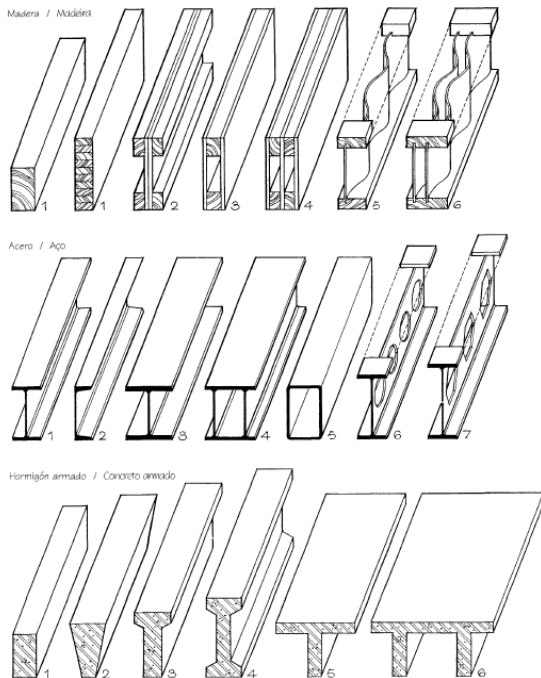


Ilustración 34: © Heino Engels, ilustración representativa, de vigas con diferentes secciones para soportar las cargas de diseño. En las estructuras de sección activa, es muy importante la forma que tienen los elementos portantes, ya que esto afecta la capacidad de carga de cada elemento, debido a la deformación ocasionada por la esbeltez que poseen cada elemento, esto para evitar el pandeo y la torsión.

“las vigas línea son elementos de construcción rectilíneos y resistentes a flexión que no solo absorben fuerzas en la dirección de su eje, sino que también pueden desviar fuerzas perpendiculares a su eje mediante tensiones internas en su sección y transmitir las en la dirección de su eje hasta los extremos. Las vigas lineales son el elemento básico de los

sistemas estructurales de sección activa”<sup>64</sup>

Una viga apoyada sobre dos columnas sufrirá una deformación, a este comportamiento se le conoce como “Momento”, término cuantitativo que es el producto de la fuerza por la distancia que hay respecto al apoyo de la viga con la columna. Este momento representa gráficamente la deformación de la viga, el cual se deforma porque la viga tiende a girar, en el sentido de las cargas a partir del eje de apoyo denominado “nodo”. Cada caso de cargas sobre una viga tiene su propia ecuación, pero el concepto básico será fuerza por distancia siguiendo el siguiente procedimiento general:

1 obtención del diagrama de momentos: En este diagrama (que se aproxima a la forma de la parábola) muestra que en el centro de esta se encuentra concentrado el momento con mayor valor<sup>65</sup>

<sup>64</sup> Heino Engel. Sistemas de estructuras. Editorial Gustavo Gili s.l. Barcelona, 2006. 1ª edición pp 28

<sup>65</sup> La carga que actúa es la misma sin importar la sección de la viga que analicemos

2 para responder con el momento obtenido se usará la sección de un material cualquiera, siempre y cuando la sección pueda soportar el momento que deformará dicha viga. Hay dos soluciones: tomar el momento de mayor valor, el que se encuentra en el centro del diagrama y seleccionar una sección que soporte ese momento o dividir la longitud a los que llamaremos tramos y seleccionar la sección según el momento de cada tramo. En este croquis vemos una viga de acero con placas adicionales para soportar el momento extra y así responder al momento solicitado.

3 en el caso del concreto armado recurrimos a “concentrar” mayor cantidad de acero de refuerzo (varilla) para que sea este el que soporte dicho momento, siempre y cuando respetemos el rango de área de acero indicado en el reglamento de construcción.

4 otro caso será realiza una viga que se aproxime a la forma del diagrama de momento con la finalidad de ahorrar tanto acero como concreto u

otros materiales con los que se pretenda construir la viga.

A estas estructuras también se les conocen como “de masa activa” pues, aunque la sección de esta es determinante para soportar los esfuerzos, será la distribución de esta en la viga lo que le otorgará rigidez, permitiéndole soportar con eficiencia los esfuerzos y vibraciones producto de un sismo.

Para una estructura de un tamaño considerable, con varios marcos rígidos<sup>66</sup> no es fácil solucionar la estructura por cálculos convencionales, en este aspecto los *softwares* han tomado un papel importante para obtener el momento último, siendo hoy en día un auxiliar tanto para arquitectos como ingenieros.

---

<sup>66</sup> Denominación para la unidad que representa una viga apoyada en sus extremos por elementos portantes como las columnas

## **CAPÍTULO II: DESARROLLO PRÁCTICO DE LOS EJERCICIOS**

### **II.1 EJERCICIOS PRÁCTICOS: RESEÑA Y EXPLICACIÓN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS EN EL TALLER EHECATL XXI**

Viendo las fotos como la cubierta Ctesiphon y su primer cubierta experimental “paraguas” Aquella foto donde Félix Candela realiza su primera estructura de cascarón basado en la forma del paraboloides hiperbólico, se puede percibir que no dejó de experimentar, analizar e intuir lo que las estructuras laminares le permitirían hacer, lo que la mano de obra podía ejecutar, es entonces que te das cuenta que la academia nos da bases de metodología de investigación contundentes, sobre todo lo que se dijo en un principio acerca de la intuición y la verificación, habla no sólo de las bases que la academia en cuanto a geometría y estructuras le han dado a los arquitectos egresados, sino además de intuir la resolución y llegar a la innovación de técnicas de

construcción, que también es parte del diseño.

Realizar su primera cubierta experimental, es una oportunidad que todo arquitecto debería tener, para así realizar esa dialéctica entre la propuesta y la edificación, es así como todo lo expuesto permite que los alumnos lleven a cabo todo el proceso de un proyecto a una escala simplificada, que contemple todos los pasos del proceso creativo de investigación y además intuir la solución, ya que, como seres humanos, ese eureka, esa serendipia si se quiere decir así, puede ocurrir en cualquier momento del proceso del diseño y la exploración intuitiva de las formas y la estructura mientras se está resolviendo los espacios, es algo que los recursos para modelar diferentes tipos de estructuras resulta indispensable.



## II.2 DESCRIPCIÓN

En este apartado se abordarán las diferentes estructuras explicadas con anterioridad y los ejercicios elaborados, especificando sus características, ejemplos con obras existentes y resultados presentados por los jóvenes del primer año de la carrera de la facultad de arquitectura, en el taller “ehecatl 21”, siendo estos maquetas de trabajo, exploraciones formales de estructuras que pueden ser tomadas como recursos para el diseño, por lo tanto estos carecen de detalle, pues estos ejemplos aplicados pretenden ser parte del bagaje de recursos que permitan a quien diseña observar diferentes soluciones, mientras se interpreta la geometría y estructura de las edificaciones, se interactúa con ejercicios que les permita diseñar cada una de los ejemplos aquí presentados para los alumnos.

Los lineamientos utilizados con los alumnos han sido mínimos, con la finalidad que trabajen con la forma con la que se han comprometido, experimentando y explorando las

opciones para ejecutar la forma y si esta corresponde a los ejemplos arquitectónicos existentes, ejemplos que no tienen relación en cuanto a escala ni a material utilizado para su construcción, sino única y exclusivamente su geometría y desarrollo.

La intención inicial no es decirles cuáles son los lineamientos del diseño estándar, cuáles son las formas “definitivas” en la construcción ni mucho menos imponer algún canon existente, si no permitirle al alumno explorar bajo su propio enfoque lo que percibe con cada una de las maquetas. Bajo el entendido que cada alumno tiene su propia visión de las cosas y al final cada aspirante a arquitecto integra su personalidad tanto a cada uno de los objetos que diseña como a su proceso de resolver los problemas técnicos.

Con un proceso general de este tipo el alumno desarrollará fluidez en el desarrollo de algunas formas, enriqueciendo las soluciones al programa arquitectónico. Apoyado a un proceso en el que se evalúan todas

las vertientes posibles con el mismo sistema estructural o varios si así lo requiere el proyecto.

Abarcar en estos documentos las condiciones técnicas pretende ser un respaldo que, ese proceso sencillo que dan como resultado formas “diferentes” no es un ejercicio vacío ni inútil pues cada ejemplo ratifica la factibilidad constructiva.

Se presenta a continuación el material para abordar cada una de las temáticas relacionadas a los diferentes sistemas estructurales, con el objetivo de que proliferen propuestas formales coherentes entre su forma y su estructura, persuadiendo al alumno que existen los medios y materiales para la ejecución de diferentes formas.

Existen limitantes ya sea sociales, económicas y normativas que influyen en el proyecto arquitectónico pero la etapa básica al que pertenecen los alumnos del primer año no permite profundizar en estos puntos, en cambio sí sugiere profundizar en los fundamentos del diseño: la exploración de la forma y la composición.

Para comenzar en el análisis de las estructuras, su comportamiento y construcción de diferentes soluciones formales, el alumno abordará el problema de cubrir, cerrar o limitar un espacio, en la manera natural que se debería proyectar: usando las tres dimensiones: maquetas o modelos los cuales pueda hasta alcanzar la propuesta deseada, si los lineamientos fueron mínimos se debe a que no se realizaron las propuestas en clase de proyectos sino en construcción, tratando de abordar así diferentes aspectos de la construcción con estos ejemplos, en ningún caso se pretende que elaboren maquetas de detalle, pero sí que puedan plasmar un envolvente que a futuro puedan aplicar entregando herramientas que a los alumnos les sirva para justificar sus propuestas. Los modelos tendrán que ser sencillos pues primero debe haber un acercamiento a la forma y su comportamiento estructural. Se aprecian como ejercicios dinámicos la construcción de maquetas.

### II.3 SUPERFICIE ACTIVA: II.II.2 ESTRUCTURAS LAMINARES, CASCARONES

Un recurso recurrente de los profesores de estructuras para explicar cómo funciona una losa consiste en utilizar una hoja tamaño carta y demostrar su deformación

Como primer ejemplo para este tipo de estructuras recurramos a un ejercicio sencillo de estabilidad estructural que podemos revisar en la cubierta del aeropuerto de Acapulco, Estado de Guerrero en México (**Ilustración 35**), así como una serie de arcadas dan rigidez y transmiten las cargas de un edificio, también se puede usar la rigidez a través de los dobleces que ofrece plegar la superficie plana, la hoja de papel al igual que una losa plana, son objetos que no pueden soportar las cargas que reciben sin que se empleen métodos para rigidizarlos, sin embargo, un doblez tiene un resultado más favorable ante los esfuerzos, sin duda una solución que refleja de manera sencilla otro ejemplo para trabajar la cubierta, “la quinta fachada”.

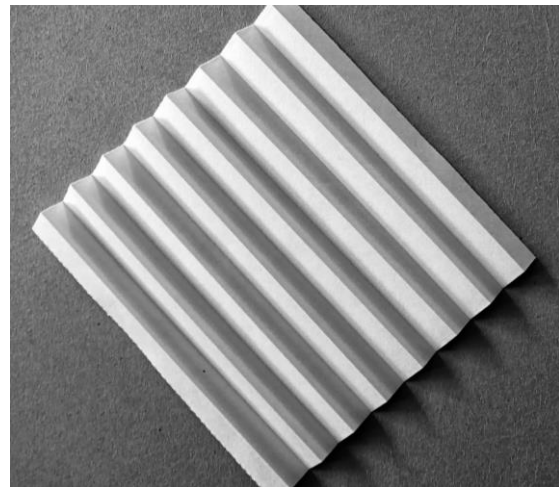


Ilustración 35: Arriba: ©Bruno R. fotografía, <https://es.foursquare.com/v/aeropuerto-internacional-de-acapulco-aca/4b9daf6bf964a52009ba36e3>. Aeropuerto Internacional de Acapulco, cubierta resuelta a base de una estructura plegada, si bien no es un sistema total de este tipo de estructuras se percibe una intención en el ritmo y una solución estructural. Abajo: ©Autor, fotografía de hoja con dobleces, muestra su estabilidad,

Si analizamos la cubierta del aeropuerto de Acapulco, notamos que la forma no afecta al resto del edificio, siendo un recurso para “rematar” la estructura, bastará tomar una hoja de papel y realizar dobleces hasta obtener la triangulación de esta

cubierta, analizando las diferentes alturas que se le desea dar a esta triangulación y discernir las diferentes vistas que se obtienen.

Así como la cúpula, arcada y bóvedas responden a una fuerza aplicada en su superficie, las cubiertas y estructuras plegadas tienen una justificación similar, además de un recurso formal para aplicar al diseño, un doblez que genere triangulaciones en una losa de cubierta no requiere de una ejecución diferente a los recursos que se utilizan en la construcción de una losa maciza.

Las soluciones que se han dado de diferentes estructuras no sólo han recurrido a las cubiertas de una “plegadura simple”, sino en algunas ocasiones usando el *origami* como fundamento para el diseño en cuestión, dando una gama impresionante, aunque poco desarrollada en la arquitectura. Estas cubiertas, a simple vista de gran complejidad y si no se maneja con cuidado transmite un lenguaje agresivo, para simetrizar y manejar y posteriormente construir estas estructuras se requiere que

incluyamos un concepto: La teselación.

(Ilustración 36).

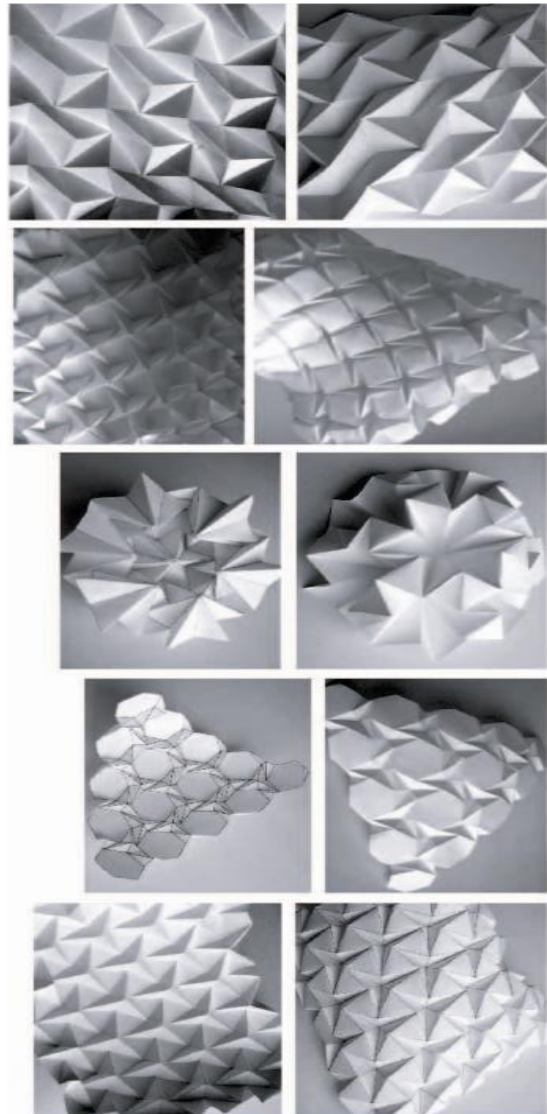


Ilustración 36: © Autor. Fotografías, La teselación aplicada al origami que puede ser utilizado en la solución de estructuras plegables. No sólo se presenta una repetición de formas sino que esto, a su vez permite darle movilidad a la hoja experimentando diferentes posiciones de un mismo modelo.

Consiste en el trazo de figuras geométricas en repetición según un

patrón seleccionado. Este método ha servido para el trazo de mosaicos, baldosas y en este caso en el *origami*.

Los ejemplos son extensos y probablemente la falta de aplicación en la arquitectura sea tan limitada se debe a la falta de procesos constructivos factibles. Se requiere una comprensión de la geometría de mosaicos y de la papiroflexia, para que el proceso no sea tedioso en el proyecto y costoso en la obra, la teselación que se utilice puede ser desde la más simple a la compleja papiroflexia, tendremos de dos a seis piezas en toda la superficie para evitar que el proceso deje de ser accesible en tanto en el diseño como poco desarrollable en la obra.

El problema de encontrar los mosaicos que se pueden plegar es difícil debido a que el papel no debe ser estirado o cortado y debe terminar como una hoja plana, esto se debe al comportamiento estructural: Estas que estas estructuras laminares deben ser estructuralmente estables deberán mantener cierto empotre en el perímetro de cada pieza.

Por ejemplo, si se construyeran a base de prefabricados éstas deberán de anclarse para que se comporten como un solo elemento evitando que estas se desplacen, pues si estas piezas se deforman individualmente, colapsarán. Es por eso que se recurre al *origami*, ya que la hoja con dobleces representa ese empotre que deberán tener las piezas. Bastará entonces tomar una teselación y buscar su emplazamiento de mayor estabilidad.

En el caso de que estas estructuras fuesen hechas con concreto armado, será necesario reforzar con acero (varilla) para que estas no fallen y este trabajo previo al colado facilita su construcción, pues a diferencia del prefabricado, no requiere de maquinaria o equipo especializado para su ejecución, además la cimbra que se habilitará para su construcción tampoco requiere de una especialización mayor a la que se requiere para una losa maciza.

Por otro lado, aunque algunas construcciones geométricas pueden ser más fáciles con el *Origami*, el

problema de determinar si un patrón geométrico puede ser viable no debería ser impedimento si se cumple con los objetivos del proyecto y se busca adecuarse a un presupuesto factible, por ahora lo importante del ejercicio es apreciar la geometría y las intenciones espaciales, maquetas rápidas que permiten determinar la geometría y el espacio que delimita. Comenzaremos hablando acerca de las estructuras plegadas, posiblemente de los elementos más fáciles de trabajar sin importar el dominio con las maquetas. Por tratarse de un elemento en el que la cubierta trabaja en conjunto tanto de estructura portante como elemento que delimita un espacio, resulta ser la cualidad de este tipo de estructuras, contemplar la estructura con la delimitación del espacio, haciendo eficiente el comportamiento estructural.

Ya se había dicho que el elemento que transmite con mayor eficiencia una fuerza es la parábola, la cual aparentemente lo manda a la cimentación. Por lo tanto, al igual que las estructuras de forma activa se

valdrán de la geometría. Mientras que las losa tienen una relación directamente proporcional entre el peralte (espesor de la losa) con su resistencia, las estructuras plegadas y los cascarones (denominado mecanismo de lámina) tienen una relación inversamente proporcional al espesor siempre y cuando la forma contribuya a su resistencia.

Una característica de este tipo de estructuras es que la forma que se escoge toma es crucial para su construcción, comportándose como las estructuras de forma activa, la superficie tendrá, necesariamente que someterse a una geometría que permita su aplicación y es ahí donde se puede permitir jugar con la delimitación del espacio con este tipo de estructuras y analizar su estabilidad estructural. Así como los modelos funiculares de Isler, Vivas y Gaudí se permitían trabajar, las estructuras plegables también pueden ser hechas las maquetas, revisar las diferentes geometrías y soluciones que un solo módulo pueden aportar a una edificación, siendo tan versátil.

En este aspecto a los alumnos se les pidió elaborar una estructura con una teselación básica, variantes de la

teselación de Eric Gjerde (**Ilustración 37**), pero en vez de que sus poligonales tengan como base un

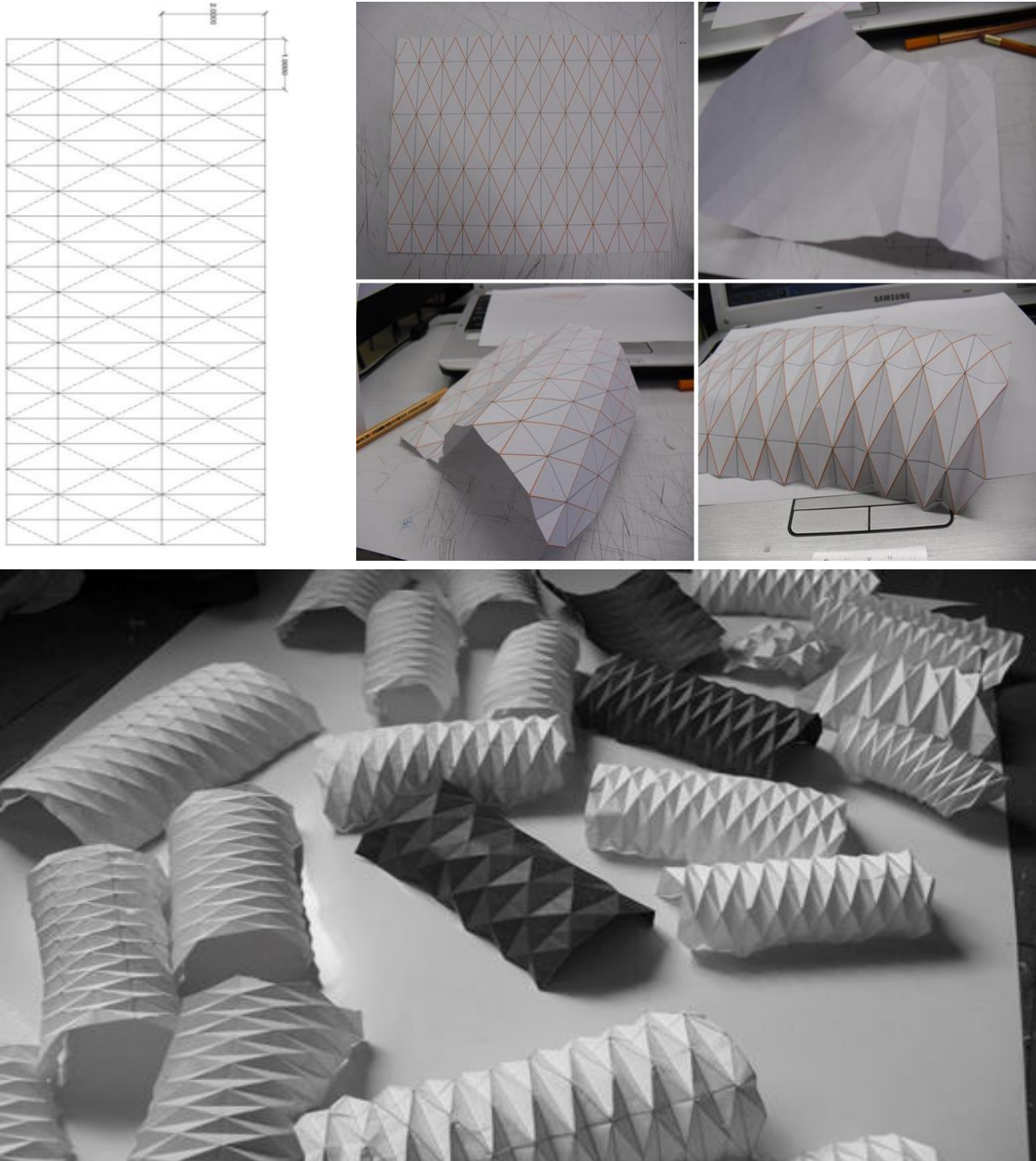


Ilustración 37: ©Autor lado superior izquierdo: Ilustración, Teselación con un rectángulo en proporción 1:2, esta es la plantilla que se le presentó a los alumnos para que ellos manipularan. Lado superior derecho: fotografía, se muestra el proceso del trazo, se presenta tanto los dobles y su elaboración para una cubierta. Lado inferior: fotografía, nótese la estabilidad que esta probable estructura laminar obtiene, con esto se puede realizar la primera imagen y solución del proyecto. Esto apenas es el primer acercamiento para realizar una cubierta o estructura

cuadrado, estas guardan una relación 1:2, sin formar la cúpula estrellada sino una triangulada, que a simple vista tiene mayor resistencia y un apoyo estable, con ello el alumno tiene un primer acercamiento al comportamiento estructural de una lámina de este tipo.

El procedimiento para este trabajo recurrió a presentar primero la manipulación para la elaboración de esta maqueta, con este mismo desarrollo geométrico. Ya que se ha percibido la facilidad de elaborar este tipo de maquetas, se procede a que elaboren esta misma y observar sus diferentes vistas y posteriormente sus diferentes formas posibles a través de la misma geometría triangular mencionada con anterioridad.

Con este ejercicio comenzamos a observar que una simple hoja ranurada nos permite no sólo un elemento que si se traspalara al diseño arquitectónico es un volumen curioso, sino una serie de formas que no tienen límite en su aplicación. Podríamos trabajar una sólo geometría del origami y notaríamos

que este desarrolla varias formas que no sólo se aplicarían al diseño arquitectónico, sino podría tener un enfoque para el desarrollo en el diseño industrial. Los resultados observados con la teselación derivada del rombo de proporción 1:2<sup>67</sup> se obtuvieron diferentes formas, tanto bóvedas como espirales, cada una ofreciendo un espacio diferente, cada hoja de papel ofrece además una textura que también puede explorarse a pesar de tratarse de una maqueta de trabajo.

Para el ejercicio se presenta una retícula, la cual muestra la variedad de las denominadas estructuras plegadas, habiendo aplicaciones que no requieren de una retícula, rápidamente el alumno asevera si la geometría y desplante de la cubierta le resulta útil para cumplir con el programa arquitectónico. A continuación, se muestra diferentes formas que estas pueden tomar con la

---

<sup>67</sup> Proporción es la relación que existe entre un objeto y sus partes, por ejemplo, el rombo mencionado mide un ancho a la mitad de la longitud. Como la proporción es una relación de "un todo" y sus partes, podríamos hablar de la relación que existe entre los diferentes triángulos que forman el rombo, pero bastará hablar de la relación de lavase entre la altura.



misma teselación. Como se observa en la ilustración existen variantes usando la misma geometría, se utiliza como bóveda, arcada o una cubierta

en espiral, pero son las mismas piezas que no se deforman individualmente sino en conjunto y eso lo hace interesante para diseñar una forma



Ilustración 38 : ©Autor. Fotografías. La teselación permite crear diferentes modulaciones o equiparticiones que nos darán como resultado diferentes soluciones formales. Después de trazar y aplicar el dobléz, podemos observar el dinamismo que este nos brinda tan solo manipulando la hoja, mientras no se definan un programa arquitectónico específico, las posibilidades formales son bastas a tal punto que no pareciera que se esté hablando de la misma teselación básica

según concepto vertido al objeto arquitectónico (**Ilustración 38**)

Con los ejemplos presentados en este trabajo, es más fácil sugerir el sistema constructivo, lo que queda como límite son las condicionantes que cada proyecto presentan, las cuales, podrían repercutir, principalmente en el tipo de material que en la forma, ya que al definir un concepto para una edificación, trae consigo una serie de acabados y estructura, lo cual no

afecta directamente con la geometría de este tipo de propuestas o en el último de los casos, este tipo de superficies bien podrían definir un lambrín, un plafón o una cubierta, lo cual aumenta las posibilidades de estas propuestas. Lo que a continuación se describe es la construcción de la estructura plegada, permitiendo a los alumnos experimentar y conocer acerca de su ejecución. (**Ilustración 39**).

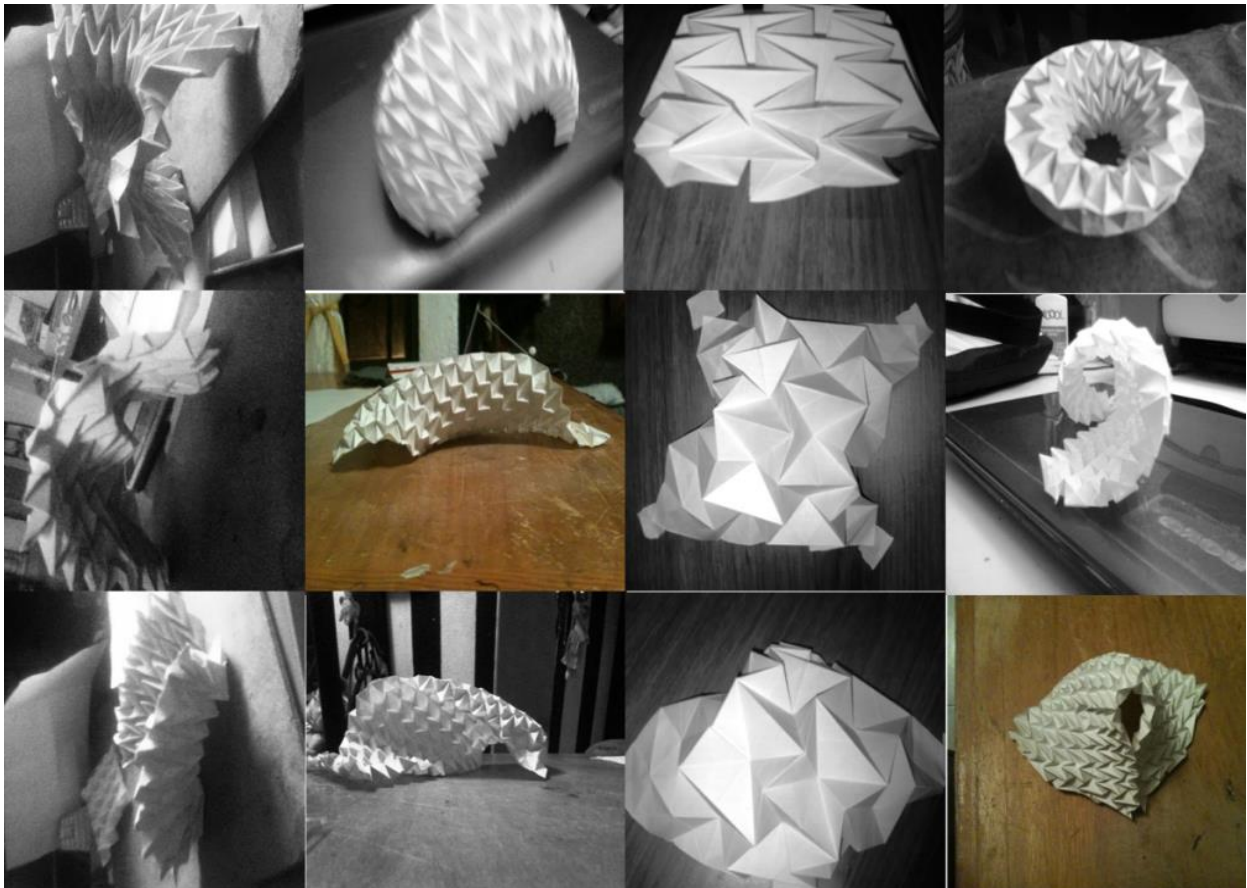


Ilustración 39: © Autor, Fotografías. Una modulación en sí misma nos otorga ya muchas posibilidades para la obtención de la forma en un proyecto arquitectónico. Este ejercicio presenta una ventaja que se han mencionado ya: La velocidad y manejabilidad de cada hoja de papel, permite discriminar diferentes formas para su selección durante el proceso del diseño, presentando una primera imagen que puede funcionar para trasladar al dibujo, definiendo en cada superficie texturas, vanos, colores, con mayor fluidez. Aunque no ha sido parte del trabajo abordar su manejo durante el diseño de un objeto, si lo ha sido aprender de este tipo de estructuras. Los ejercicios aquí mostrados son vistas que los alumnos el taller Ehecatl 21 y Hannes Meyer de primer semestre han elaborado, mostrando sus diferentes vistas que bien podrían utilizar.

## II.4 EJECUCIÓN DE UNA ESTRUCTURA PLEGADA

Lo que se aprende cuando se realiza una obra o un proyecto de este tipo no es solo la estructura en sí, sino todo aquello que interviene para que se lleve a cabo una obra: control de personal, materiales, tiempos y costos. Programar avance y demás problemas que se presentan en la obra, algo que se aprecia en estos ejercicios dejando un impacto de lo importante de realizar un buen programa de ejecución

La intención de realizar estructuras a escala 1:1 o 1:2, no es difundir lo que el dinero y mano de obra puedan realizar alguna estructura sino enfrentar al alumno a un ejercicio que deba llevarlos a la dificultad que los detalles afectan a los constructores, se concluyan o no las estructuras dejan enseñanza, tan solo de logística, que para la ejecución de cualquier encomienda al arquitecto es necesario tomar en cuenta para cumplir con los tiempos programados. Por lo que la conclusión de cada estructura deja en sí la enseñanza que sólo la práctica permite.

El ejercicio llevado a cabo ha permitido enfrentar a los alumnos a replicar los problemas de cambiar la escala de maqueta a un modelo de dimensiones considerables, pero con el mismo comportamiento estructural a pesar de que en la escala real no se puede tomar una lámina y plegarla, pero se observa que el comportamiento de la lámina y su factibilidad se refleja en su factibilidad constructiva, a continuación, se explica el procedimiento. Con MDF como material, se realizaron las piezas triangulares articuladas según en maqueta y el dobléz que este tenía para ubicar bisagras y tornillos, estas piezas no se podrían montar en una sola pieza y maniobrarla para su ubicación, por lo que se construían en módulos para

Con MDF como material, se realizaron las piezas triangulares articuladas según en maqueta y el dobléz que este tenía para ubicar bisagras y tornillos, estas piezas no se podrían montar en una sola pieza y maniobrarla para su ubicación, por lo que se construían en módulos para montar uno a uno en su lugar para atornillar, el ejercicio consistía en crear

un espacio para la proyecciones, el primer tropiezo fue el presupuesto, por lo cual se decidió construir la

estructura a escala 1:2. (Ilustración 40).



Ilustración 40: © Guerra Martínez Roberto Carlos, fotografías. Estructura plegada. Taller de maquetas, Taller Ehecatl XXI Los jóvenes hicieron las siguientes deducciones: Si la maqueta manipulada en clase, no se deformaban los triángulos en las que se descomponía la cubierta, podrían fabricar cada pieza, fijarlas y colocarles las bisagras según el pliegue definido y ya que la escala seleccionada permite que se pueda cargar por una persona, se arma un módulo autoportante y al final ensamblar en sitio cada módulo.

El tiempo que le tomó es considerable para un ejercicio que no pertenece al área de proyectos, pues demorarían tres días elaborar las piezas y los problemas de logística se confrontarán cuando se realice el montaje de la estructura a pesar de que ya se había ensayado el ensamble de las piezas individuales.

Con la premisa de que el arquitecto no debe ser necesariamente un erudito sabiendo calcular todo tipo de estructuras y sus comportamientos según condiciones de cargas y factores accidentales, lo que este y otro tipo de ejercicio genera en el alumno es certeza y confianza para proponer diferentes tipos de estructuras a los cuales sus soluciones se verán apoyadas por su cercanía directa a estas propuestas que pueda elaborar.

Lo que se observó es el dinamismo para manejar cada maqueta, sin ataduras, olvidando la dificultad de dibujar los detalles o la dificultad para ejecutar la maqueta ejecutiva, olvidándose del problema de la planta a la que en algún momento nos

encerramos olvidando el diseño en sus tres dimensiones, se toman otras estructuras para comprensión de los alumnos, además de observar cómo una estructura plegada obtiene rigidez, hay otros tipos de estructuras que pueden permitirle presentar otras opciones formales relacionadas a la geometría.

Como se dijo en un principio, estas exploraciones formales tienen la virtud de no necesitar ni herramientas computacionales de ningún tipo ni dibujo técnico avanzado, por lo tanto, este material didáctico amplía las posibilidades en el diseño sin encasillarse a cuestiones de manejo de herramientas pues la arquitectura no se diseña a través de herramientas pues sólo son una extensión de nosotros mismos, promoviendo así el diseño de una manera más directa y efectiva. Un reto para cualquier estructura está en que se construya a una escala mayor para así observar las complicaciones propias de la construcción: traslado, ensamble, materiales, costos y mano de obra. **(Ilustración 41)**



Ilustración 41: © Guerra Martínez Roberto Carlos, fotografías. Ensamble de las piezas de la estructura plegada, conexión de cada pieza, módulo y al final traslado al "patio de los huesitos" de la facultad de arquitectura

## II.5 DESARROLLO DE UNA ESTRUCTURA DE SUPERFICIE REGLADA

El ejercicio más sencillo y básico para un primer acercamiento será la rotación y traslación de una recta, cónica o cualquier otro trazo. Se enuncia entonces los siguientes ejemplos con sus respectivas interpretaciones geométricas. El Nine Bridges Country Club / Shigeru Ban Architects. El arquitecto Shigeru Ban diseña una serie de columnas a partir de la rotación de un perfil recurriendo a la unión tangencial de dos rectas para definir el fuste y la cubierta integrándose con un arco formando así un capitel sinuoso que se mimetiza entre la columna y la cubierta, Entonces en el desarrollo de una propuesta geométrica se toma este ejemplo para desarrollar primero una columna, con el tratamiento de una curva que sea la que una con la cubierta, en ambos casos tangencialmente para mostrar esa sinuosidad en la estructura, permitiendo no sólo replicar sino generar su interpretación de la

estructura y de la forma (Ilustración 42).

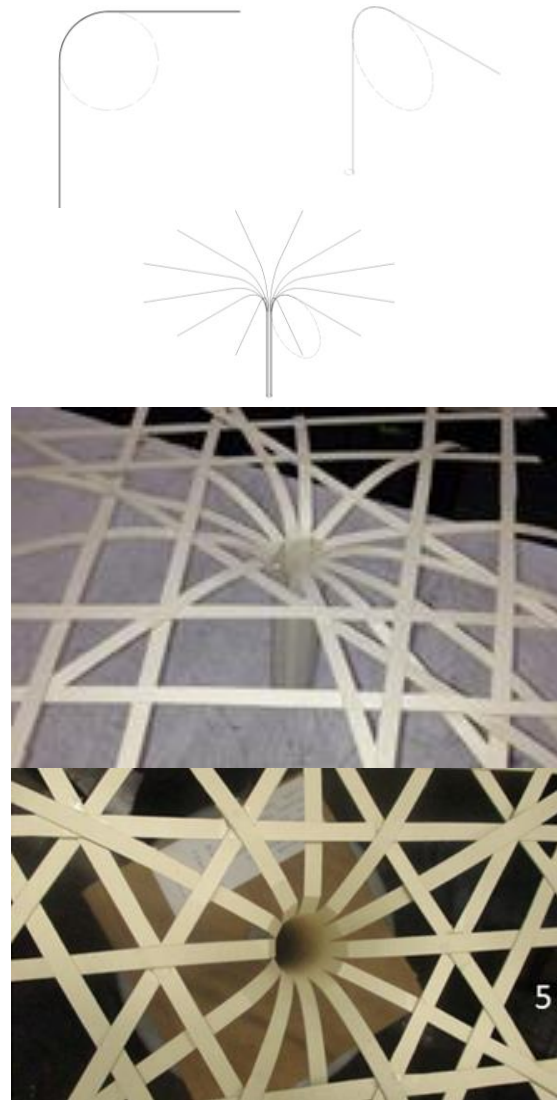


Ilustración 42: ©Autor, Desarrollo de una superficie reglada: 1.- Ilustración: se define el trazo de un par de rectas unidas con una circunferencia tangencialmente 2.-Ilustración: se define el radio en el que se trasladará la línea definida 3.- Ilustración: se define el número de elementos para formar la superficie 4.- y 5.- Fotografías: ejemplos elaborados en clase. No se pretende replicar en su totalidad el ejercicio, sino entender de manera general la forma y su elaboración, tanto en el dibujo como en la maqueta, ya será a consideración de los alumnos cómo aplicar este ejemplo. En este caso se descarta el trazo de elementos mas específicos, como la estrella de David utilizado en la obra del arquitecto Shigeru Ban

Nótese que el fuste y columnas son superficies alabeadas, donde se definió una sección de esta pieza y se rotó sobre un eje mientras que la cubierta, se perciben secciones de cúpulas y superficies alabeadas a base del paraboloides hiperbólico de una manera discreta en la composición. En el proceso del diseño se realizan interpretaciones en la geometría, como ocurrió con la cubierta del king cross station en donde lo interesante es entender el proceso con el cual se producen estas superficies, ya que este último no se puede considerar como una estructura de superficie activa pero su desarrollo geométrico basado en el desplazamiento de una línea hace notar la versatilidad que estas geometrías pueden aportar en el diseño **(Ilustración 43)**.

Siendo similar al ejercicio anterior, el procedimiento consiste en la generación de una superficie a través del desplazamiento de una línea, la interpretación se vuelve entonces variada con el mismo concepto básico de la superficie en revolución aplicado a escalas y formas diferentes.

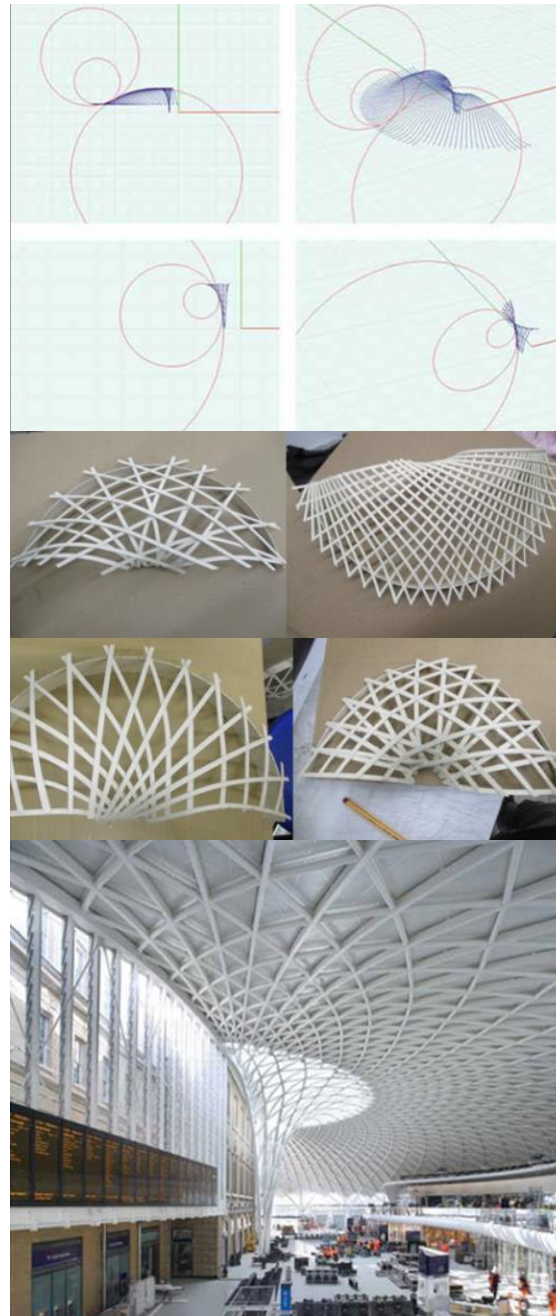


Ilustración 43: ©Autor (arriba) Ilustraciones: la generación de la cubierta del King Cross se basó en la rotación de una línea con diferentes arcos unidos tangencialmente, formando una interesante cubierta a través de una superficie en revolución. (Enmedio) fotografías: ejercicio de una cubierta interpretando la superficie en revolución, siendo similar al ejercicio anterior demostrando la versatilidad para la generación de formas. Abajo: ©John McAslan and Partners, John Sturrock, Hufton and Crow, Phil Adams, fotografía: Cubierta King's Cross Station



Lo interesante de este ejercicio, como se podrá notar es que la superficie generada no necesariamente indica el material a construir, pues pueden dar pie a construirse con acero y posiblemente no se calcularán como un manto o superficie, pero con dicho desarrollo puede darse el caso de que se construya según las posibilidades de los materiales, en el caso del “Nine Bridges Country Club” se desarrolló a base de madera, omitiendo las rectas en revolución y utilizando un entramado con la estrella de David, pero pudo haber utilizado las rectas generadas por el desplazamiento, para ubicar cada viga de madera, pues cada recta se convierte en viga de madera; perfil de acero como en el King Cross o en el armado de una estructura de concreto como la obra de Toyo Ito, el Crematorio Meiso no Mori del cementerio de Kakamigahara, la cual se comportará como una superficie activa, siendo esta un ejemplo similar al Nine Bridges Country Club, pero con una cubierta que parece tomar la forma correspondiente al momento en losas, dando con ello una cubierta alabeada compleja donde una cubierta alabeada

se integra a una superficie reglada en revolución.

Cabe recalcar que las rectas que generan dichas superficies también son las que definen la colocación de las tiras o fajillas de la cimbra, siendo un ejemplo de cómo la geometría y la estructura forman un objeto, siendo también un ejemplo de cómo se construyeron otras obras que utilizaron las superficies regladas, los paraboloides hiperbólicos de Félix Candela.

Los alumnos desarrollaron entonces una superficie a proporciones y escala propias, pero tratando de generar una superficie a consideración del desplazamiento de la forma generada y en caso de ser construida, se puede tomar la maqueta para obtener radios, empalmes tangenciales, longitudes, etc. Todo lo necesario para su construcción según el material, ya sea madera, acero, concreto.

No fue posible concluir en su momento una estructura basada en estas superficies a toda regla, pero la experimentación en este tipo de

estructuras dio como resulta la maqueta que se presenta a continuación:

Consistió en la elaboración de una superficie a base de unicel, en forma de negativo para así, descansar sobre estas tiras de papel batería basada en

el entramado que realizó Shigeru Ban para su cubierta. (Ilustración 44)

Para una escala mayor, tendrá que considerarse la escala del negativo que sirva de base para la obtención de la forma definitiva o utilizar una forma que sirva de base para explorar este

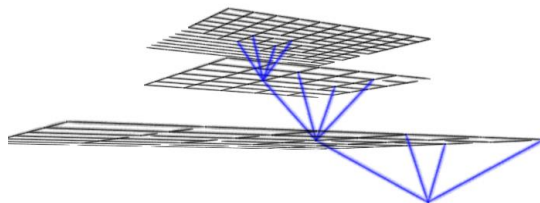


**Ilustración 44:** © Delgadillo Acevedo Oswaldo, **Fotografías:** Experimento para la aproximaciones en el manejo de una superficie alabeada, realizando un modelo en negativo con unicel y obre esta colocando un entramado del cual se obtiene la forma con cuatro apoyos, se puede apreciar dificultad en la transición de curva a rectas y la falta de continuidad entre una barra a otra, pero es un buen ejemplo para determinar una primera imagen para un objeto arquitectónico.

tipo de estructuras, como es el caso de la maqueta basada en la cubierta del King Cross Station

## II.6 DESARROLLO DE UNA ESTRUCTURA DE VECTOR ACTIVO

En este caso a los alumnos se les pide repetir una serie de propuestas para aproximarse a este tipo de estructuras, fáciles de plantear, primero se les pide una cubierta rígida para recibir la estructura arborescente, basada en una retícula para desplantar los nodos que recibirán la cubierta se distribuyen hacia los apoyos que sostienen la cubierta. Para este ejercicio se utilizan diferentes cubiertas para ello, con lo cual se asume la versatilidad de la estructura. “diseñado por Meinhard von Genkar en Alemania (1991), un conocedor de aeropuertos, edificaciones que han constituido una tipología habitual en su carrera, el aeropuerto parece una gran ala inclinada en la llanura de las afueras de Stuttgart (ilustración 45).



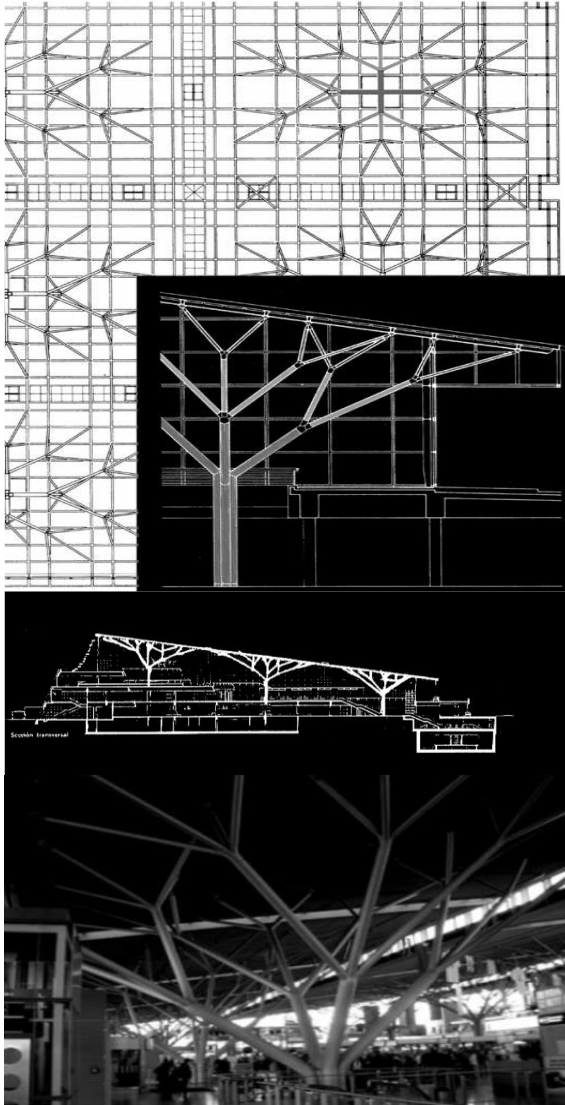


Ilustración 45: Marcel Antonio Maury, Ilustración de la columna del Aeropuerto Internacional de Stuttgart, T3 terminal 3 del aeropuerto de Stuttgart. Estructura arborescente.

*En él se manifiesta el diálogo entre una estructura pesada de concreto (basamento escalonado), con un gran vestíbulo con cubierta ligera de*

*celosías de tubos de acero y tirantes en dibujos metamórficos.”<sup>68</sup>*

El volumen del edificio se divide en dos cuerpos: un gran vestíbulo de sección trapezoidal en el cual se realiza la llegada y salida de pasajeros y un bloque bajo en donde se ubican las salas de embarque y donde los pasajeros toman los autobuses que los llevan a los respectivos aviones.”<sup>69</sup>

Para la ejecución de esta actividad se ha generado una dinámica para ejemplificar la construcción de este tipo de estructuras: primero la actividad, centrada a mostrar la simplicidad y facilidad para revisar una propuesta estructural, elaborando una estructura espacial plana, seguida por una estructura curva en sólo sentido y al final una estructura arborescente, donde se revise el comportamiento estructural.

---

<sup>68</sup>la estructura como generadora de espacios arquitectónicos, red de revistas científicas de américa latina, el caribe, españa y portugal sistema de información científica <http://www.redalyc.org/pdf/1251/125112640009.pdf>

<sup>69</sup> ibid

Para la construcción de una estructura arborescente será necesario, por cuestiones didácticas, generar una rectícula para el desplazamiento de las barras y su inclinación, así se determinará la ubicación de las barras y su desplazamiento. A partir de esto se generan diferentes soluciones ya sea por el módulo de la retícula o el material utilizado. Con ello al alumno no se le sugiere en primera instancia explorar otros tipos de teselaciones sino las deformaciones que se pueden obtener de estas estructuras, con ello la gama de soluciones formales dadas a partir de un desarrollo geométrico es extenso, soluciones para diferentes aplicaciones en propuestas de diseño que, basándose en el principio de la ley de la economía de la sustancia del mundo orgánico. No es una ley universal aplicable a todo, es sólo una opción aplicable a la arquitectura y al diseño industrial, como un fundamento más para explorar, demostrando su vigencia en el marco teórico y además mostrando en este trabajo la variedad desarrollada en el curso. A nivel de maqueta, se recurrió a un ejercicio para explorar un comportamiento

estructural para explorar la geometría que el vector activo de cada barra pueda ofrecer (**Ilustración 48**): Se definió un entramado regular y a partir de estas ubicaron postes que después se van uniendo a otros postes y estos a su vez a otros que, al invertir la estructura, serán las cubiertas.

Algunos alumnos realizaron una disposición de elementos más regular, mientras que otros decidieron realizar estructuras más dinámicas que, al tener un entramado regular, intuyeron la ubicación de sus columnas y así evitar que no fuera una maqueta autosoportante.

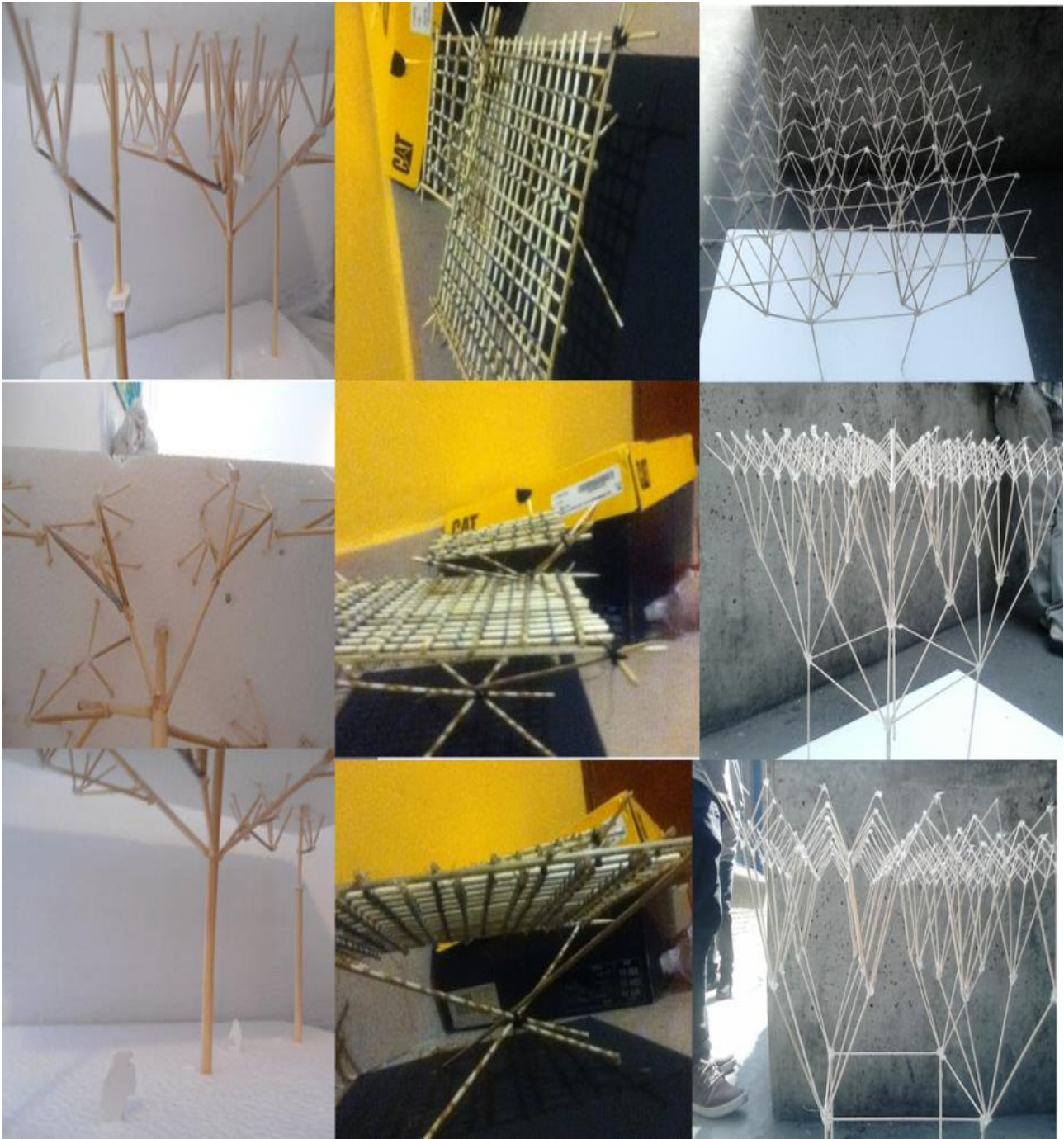


Ilustración 46: ©Autor, fotografía. Retículas y desplazamiento de las barras, cada ejemplo con sus propias características define y delimitan un espacio de manera virtual según cada solución

## II.7 ELABORACION DE ESTRUCTURAS A BASE DE PVC

Cabe resaltar que, en ningún caso, se les condicionó a los alumnos escoger alguna forma, estructura o material, con la información dada, lo único que se podía esperar es que se concluyera el ejercicio ya que los alumnos en general son de recursos limitados, por lo cual algunos equipos se disolvieron al ver que no tenían los recursos suficientes para realizar el ejercicio y aportaron su capital financiero y mano de obra a otros proyectos. Al final, como cualquier ejercicio concluido se realiza una introspección de lo cual sólo los alumnos sabrán medir el impacto y la enseñanza que les deje más allá de lo que el profesor pudiera decirles. A continuación, se realiza la explicación de 2 ejercicios que utilizaron PVC para cubrir el espacio.

## II.8 DE ORIGAMI A PVC

Este ejercicio, comenzó como una pieza de origami, la cual al revisar su presupuesto entre tres personas decidieron replantear su ejercicio: cambiar la escala y pasar al PVC. Esto

los llevaría a considerar otros problemas y soluciones. Se resolvió lo siguiente: (**Ilustración 47**)

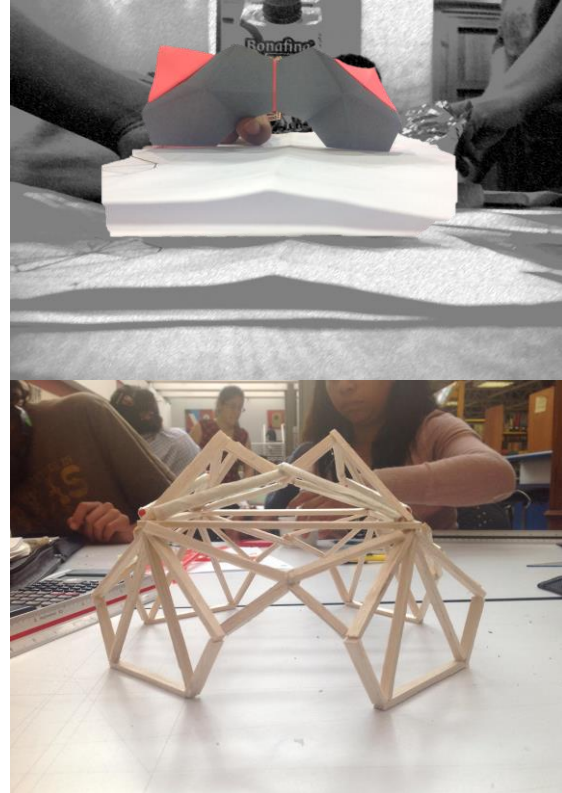


Ilustración 47 ©Gines Cabrera M, Villarreal A., Hernández G., Fotografías: Arriba: Propuesta original de papel, una cubierta que se pensó originalmente de madera pero que se trasladó a otro material para ajustarse a su presupuesto

Las conexiones serían de PVC y se adaptarían las menos posibles. Una solución simple, pero es una realidad que el presupuesto limita cualquier tipo de solución que, a pesar de su eficiencia no significa que sea parte de la propuesta. Existen, como vimos en el apartado de “ARMADURAS CURVAS Y PLANAS”, existen toda clase de nodos especializados para recibir las barras que nosotros

queramos para diseñar y concebir una estructura, pero como en obras de bajo presupuesto, se recurre a realizar ajustes en las barras para que sean recibidas en cada nodo. **(Ilustración 48).**



Ilustración 48: ©Gines Cabrera M, Villarreal A., Hernández G., Fotografías. Solución final de la estructura de PVC sanitario, nótese la manera de generar toda la estructura general para la estructura. Como colocar dos piezas de pvc para permitir que el nodo reciba todos los tubos o las piezas de conexión convencional fuera del nodo para codo y té de PVC.

Para poder ajustarse a las limitaciones que el PVC sanitario les ofrecía, ajustaron ligeramente la geometría del volumen para usar los codos y las conexiones con los que se comercializa este material. A pesar de que en la maqueta se presentara el volumen como una estructura de forma activa, pasar al PVC les permitía analizar su cubierta como una estructura de vector activo y así

sustraer cada cara y darle el material que quisieran. Aunque si cambiamos la escala, probablemente estas caras, deberían ser diseñadas para autosoportarse y transmitir su carga a la estructura principal.

Para recibir dos barras horizontales donde el nodo recibía cinco barras y una de estas transmitía la carga casi vertical como si se tratara de una barra portante, decidieron colocar dos barras, para que, cada una con un codo de PVC, recibirlas, mientras que dos barras que llegaban de forma diagonal le hacían una extrusión para adaptar la barra diagonal a la barra vertical.

En el caso de los nodos que recibían 3 barras, solucionaron usando un codo para recibir dos barras y una tee de PVC, para recibir la tercera barra, caso que, si tratara a una escala mayor, probablemente ya no se tratara de un nodo que trabaje como parte de una estructura de vector activo, probablemente este nodo sea considerado como dos nodos y se calcule como una excentricidad que genere un giro en el nodo principal. **(Ilustraciones 49 y 50)**





Ilustración 49: ©Gines Cabrera M, Villarreal A., Hernández G., Fotografías. Conexiones fuera del nodo para aprovechar las conexiones convencionales

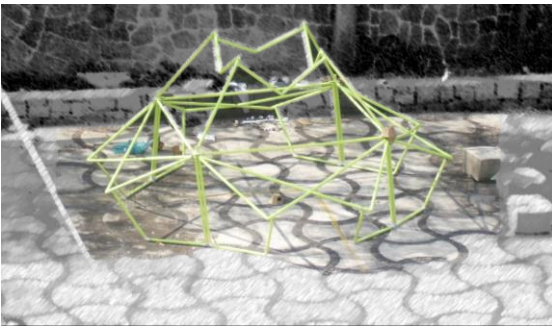


Ilustración 50: ©Gines Cabrera M, Villarreal A., Hernández G., Fotografías. Presentación de la estructura. Se presenta sólo el esqueleto

## II.9 PVC PARA UNA TELA DE MALLA SOMBRA

Un grupo de alumnos decidieron realizar un ejercicio similar a las estructuras conocidas como velarias. El motivo por el cual no se mencionó en este trabajo, es porque no se pudo abarcar en el curso de alguna manera y de hecho fue por su iniciativa que realizaron una estructura de forma activa con esta opción. El material para realizar un ejercicio así es muy extenso, sin embargo, se mencionará grosso modo, que la tela absorbe la tensión auxiliada con una serie de arcos de PVC, los cuales se encargarán de absorber cualquier fuerza de flexión que pudiera ocurrir y además de mantener la forma de la velaría.

En este caso, la arcada de PVC se encargaría de absorber a compresión, el peso de la tela seleccionada, que, en este caso, por cuestiones de presupuesto, se trató de la tela conocida como malla sombra y además diseñaron unos elementos que servirían de dados para poder fijar los arcos a un piso que no podía recibir ningún tipo de trato por los trabajos a ejecutar. La única indicación

es que los dados debían mantener una relación con el resto de la cubierta, es decir, que no fueran simplemente unos bloques en forma de paralelepípedo.

Un tema que quedó fuera de tratamiento fue la fijación de la tela a los arcos, las cuales simplemente se fijaron con cinchos de plástico. También por cuestiones de presupuesto, el MDF que formó parte de los dados comprimirían las piezas de PVC (Ilustraciones 51,52 y 53).



**Fotografías** Montaje de la estructura en “El patio de los huesitos” de la facultad de la arquitectura. No se aplicó la suficiente tensión pues la estructura no fue capaz de soportar las fuerzas que la tela se encontraba transmitiendo y la tela tampoco lo soportaría. Nótese en la imagen de abajo el cocido de cada malla, donde se ven los ojillos perimetrales que trae de fábrica el material



**Ilustración 51:** © Espinoza N., Torreblanca Mariscal S., García. J, Cervantes E., Fotografías Montaje de barras de PVC



**Ilustración 52:** © Espinoza N., Torreblanca Mariscal S., García. J, Cervantes E., Fotografías. Fabricación y montaje de la base

## **CAPÍTULO III: A MODO DE CONCLUSIONES**

### **III.1 CONCLUSIONES GENERALES**

Debido a la cualidad de la arquitectura, de que estamos hablando de un proceso dialéctico donde hay una propuesta y después su verificación, donde el proceso de diseño incluye plasmar ideas y reafirmarlas como volúmenes y espacios dentro de una composición que inmediatamente al dibujarlas, tu percepción y análisis define si lo que has plasmado será parte de tu diseño o será desechado, el alumno entonces tendrá que acostumbrarse a recurrir a esta metodología de manera constante en cada cosa que diseñe. Estos ejercicios pretendieron que el alumno se apropie de una metodología para abordar ideas tan simples pero contundentes para resolver un problema, pero siempre desde una percepción visual, con maquetas, pues es una manera eficiente que el modelado entorpece.

Un niño, por ejemplo, primero aprende a entender su entorno a través de los sentidos y aunque le estén leyendo, su

oído y su mente se encargan de entender lo que sucede. Ahora la lectura en voz alta permite un análisis más complejo, entender lo que se va a leer, entender lo que se está escuchando, reforzando el aprendizaje, proceso que, con los años se perfecciona. Lo mismo ocurre con esta propuesta, los alumnos se enfrentan al problema social, la necesidad de cubrir un espacio, a través de diferentes tipos de maquetas, pensando en la estructura y la geometría al mismo tiempo que el espacio, eso es lo que enlaza a la mayoría de las maquetas y estructuras que se pudieron ejecutar en estos ejercicios.

No resulta novedoso ni innovador cuando se piensa que muchas escuelas tienen laboratorios de estructuras, donde se ensayan estas estructuras o que algunos talleres hagan una ambrosia de “stands” donde el alumno apenas participa, lo interesante de este trabajo es que, este ejercicio pretende enlazar la mayoría de asignaturas que la facultad de arquitectura ofrece para los alumnos de primer año, con la integración de varias asignaturas

desde el principio de la carrera se pretende reforzar la idea de que la arquitectura es un todo que trabaja al mismo tiempo desde que se visita el terreno, desde que el arquitecto se entera que el cliente requiere cierto objeto arquitectónico.

Porque, cuando un arquitecto por fin ha plasmado un objeto ya sea un mueble, una estructura como en este caso o un objeto arquitectónico como ocurre en la vida profesional / servicio social / prácticas profesionales, se aferrará a emplear una metodología y perfeccionarla, ya desde que visita el terreno está pensando en costos de obra preliminar, las diferentes geometrías que podrían adecuarse a su objeto arquitectónico y el entorno al que este va a interactuar.

Las entregas de proyecto ya definen cómo un alumno se aproxima a un problema, pero este enfoque de pensar en la forma-geometría, como se ha visto en ejemplos descritos anteriormente, es una buena opción que varios arquitectos han usado para resolver sus propuestas y es que se ha mencionado que antes de hacer cualquier análisis dentro del proyecto y

que a veces cuando se paga un anteproyecto no incluye análisis estructural, por ejemplo, es imperativo que el alumno se aproxime a herramientas de análisis que le permitan definir la forma y la estructura desde el anteproyecto, con la certeza de que son viables.

La experiencia que todos tenemos acerca de las maquetas es variada. Primero que sentimos frustración cuando un profesor mutila nuestra maqueta y el problema radica en el enfoque de dicha maqueta. Cuando estás realizando tu propuesta arquitectónica tu maqueta es una herramienta de diseño, pero no un objeto de presentación. O sea que no se trata de un objeto definido, se trata de una idea en proceso, del cual no hay nada inamovible, todo lo contrario, al trabajar la maqueta o presentar la maqueta a revisión, esta puede ser completamente modificada y por lo tanto mutilada, cortada, reinventada. No se trata de un capricho docente, sino que las mejores ideas para una propuesta suelen venir de las ideas más descabelladas, replanteando una idea que se cree irrefutable o simplemente buscando la “inspiración”

en ese proceso intelectual de plasmar ideas y comprenderlas.

Es por ello que los ejercicios aquí presentados no hablan de una maestría en la ejecución sino la representación de una idea, la cual el diseñador valorará según a la idea que pretende llegar. Porque esa es la finalidad de una maqueta de trabajo: Convertirse en un instrumento de interacción, del cual mientras más rápido se ejecute, se realizarán las valoraciones pertinentes según lo que el proyectista quiere o pretende lograr según el programa arquitectónico.

¿Cuál es el límite acerca de la idea concebida? Es decir, si tenemos una idea que en un inicio puede ser de gran valor para un proyecto arquitectónico ¿Se ha tenido éxito a pesar de que no se han pasado varias horas más buscando aquella forma y orden para nuestro proyecto? Puede ocurrir lo opuesto, simplemente no haya una idea que satisfaga en su totalidad el programa arquitectónico ¿Se ha fracasado en la búsqueda de aquella forma?

Debido a estas consideraciones que este trabajo no es un manual acerca del diseño o la aplicación de estas formas en el proceso del diseño. Pues prácticamente cada profesor define los lineamientos para determinar en qué momento la idea o primera imagen podrá ser desarrollada para posteriores etapas del diseño, permitiendo que el proceso del diseño sea manejado en favor del proceso creativo y no necesariamente como un requisito que se debe cumplir con un mínimo de variantes.

La finalidad de cualquier clase de *proyectos*<sup>70</sup> es que el alumno tenga las herramientas que le permita realizar cualquier propuesta, donde los recursos deberán ser agotados hasta determinar una propuesta arquitectónica que satisfaga un programa arquitectónico y variantes o condicionantes que el profesor defina para las propuestas. Por lo tanto y debido a la complejidad del proyecto, este trabajo es un compendio para

---

<sup>70</sup>Nombre con el que se conoce a la asignatura donde se realiza el diseño y aplicación de las técnicas y herramientas del diseño dentro de la facultad de arquitectura

enriquecer las opciones para ejecutar dichas propuestas.

A pesar de los avances de la informática y las herramientas que de esta emanan, como hemos visto que las maquetas de trabajo están lejos de ser reemplazadas, es más las mesas vibratorias, mecanismos para probar estructuras ante sismos, resultan ser ilustrativas y demostrativas de lo que es una estructura y su comportamiento, es decir, aproximarse al objeto arquitectónico a través de la maqueta con la finalidad de proveer ideas para una solución, es imprescindible.

Pero todo lo que se haya dicho con anterioridad no es nuevo, de hecho, hasta la idea de contemplar varias asignaturas para realizar esta estructura (me refiero al hecho de hablar de geometría, sistemas estructurales, elaboración de maquetas de diferente tipos de formas y su relación estructural en la clase de *construcción* para proponer una cubierta) es un fin que la facultad y sus profesores de proyectos dicen alcanzar, así que me enfocaré en la retroalimentación que el proceso de

edificación hace por los alumnos involucrados en este proyecto.

Cada que pienso en una obra que haya marcado mi formación académica, pienso en el primer proyecto que realice y verla erigirse es algo que impacta porque ahora analizas cada detalle de esta obra, cómo funciona y cómo se presenta ante el usuario, este momento me dio mucho de qué pensar para futuras propuestas, ese gozo de que yo llevara los ejes y criterios para resolver los detalles en obra fue algo que te marca pues aprendes a defender tu propuesta y darle solución ahora en el proceso de obra y no desde la oficina. Esa es la insistencia de enlazar todos los

Es así como decidí realizar una propuesta para los alumnos como un recurso pedagógico con las diferentes ideas que se escribieron en estas páginas. Por ejemplo, cuando los alumnos del taller descimbraron su primera bóveda apoyada en los muros que ellos mismo fabricaron, se volvió en un momento de júbilo y ese proyecto se quedará se su memoria no solo por la propuesta en sí, sino todo lo que implicó para ellos realizarla

y eso es algo que ningún proyecto les marcará tanto hasta que comiencen a construir sus propios proyectos, esas estructuras, son suyas, se apropiaron de ese proceso y ese ejercicio simplificado, les llevará siempre a compararlo con las obras que realicen, pues sin importar la magnitud del proyecto o la obra, el manejo de recursos materiales, humanos y de tiempos de ejecución, ya no les será tan ajeno, de alguna manera ya lo han asimilado mejor. Una foto de la descimbra de cualquier losa les remitirá a aquel momento en el que ellos mismos lo hicieron y entenderán más fácilmente cómo y por qué se ejecuta de una u otra manera un objeto arquitectónico, se vuelve en un referente para entender lo que en otras asignaturas y en el campo profesional verán.

Como arquitecto consagrado en la investigación, el doctor Olvera, dedujo que cualquier proceso de investigación, si no es lineal o rígido, pero si entendía que debía ser integral, así pues, la Preparación-Incubación-Intuición-verificación son elementos que se pueden llevar al ritmo, estilo y cantidad que cada

arquitecto prefiera, pero lo que siempre determinará no sólo la experiencia sino la capacidad de un arquitecto a resolver un objeto arquitectónico, será esa interacción entre lo que pudo verificar de sus propias propuestas y a la vez observar cómo los demás han resuelto otras propuestas arquitectónicas, siempre desde esa experiencia ya adquirida.

Los ejemplos citados a través del documento se enfocaron en arquitectos que se auxiliaron de maquetas antes que el cálculo pues así tuvieron la libertad de intuir la forma y su estructura anteponiéndose a la rigidez del AutoCAD analizando cuál es la mejor opción sin pensar en los impedimentos de esta, los alumnos que realizaron la estructura plegada, por ejemplo, intuyeron que era factible realizarla pues ya tenían la maqueta a escala y además el hecho de que el proceso para la obtención de la forma consistió en realizar cortes al papel para después deformarla a su gusto conociendo los límites de esta lámina mientras la deformaban de una u otra forma, también les permitió intuir que podrían armar la cubierta completamente extendida y en

módulos, concluyendo que no se presentarían ningún inconveniente de ensamble y conexión al momento de plegarse y montarse pues escogieron la forma que en el papel plegado no sufría rasgaduras y desprendimientos de los módulos en la maqueta. Y así como escogieron esa forma, pudieron haber escogido alguna otra usando esa misma lógica pero que tal vez hubiese requerido un proceso de montaje más complejo.

Lo mismo ocurre con la cimbra de bóvedas, los alumnos entendieron que el empuje de cada elemento les causaría un colapso, pero fue ese proceso que les permitió entender cómo vencer este inconveniente, como en las civilizaciones antiguas pudieron haber intuido algo similar, pero no necesitan hacer cientos de metros de bóveda para entender este fenómeno y así aprender el comportamiento de la mampostería.

Es por esto que el proceso de edificación de este tipo de cubiertas: simplificando el programa arquitectónico, requerimientos, dimensión y escala hace de este proceso, idóneo en los alumnos de

primer año, reafirmando lo que los antiguos constructores hicieron para poder llevar a buen fin sus propuestas, acercando a los alumnos a la experiencia de concluir un proyecto pasando por todo el proceso, no pretendo en todo caso desestimar lo que en la academia se practica, sino que este tipo de ejercicios, complementan la actitud y postura de los alumnos ante la resolución de problemas prácticos y específicos. Cada alumno se enfrentó a resolver un problema que no tenía el 100% de los conocimientos y las respuestas a lo que ellos mismos se planteaban, eso también los lleva al compromiso pues a pesar de recibir asesoría de parte de su profesor de cátedra, el ejercicio era totalmente su idea y su propuesta, eso también lleva a que no dependan de lo que el profesor les de como información, respuesta u opinión acerca de lo que cada equipo hizo, además que con las estructuras hechas se vuelve totalmente ilustrativa para sus compañeros y así ellos mismo evalúan lo que cada equipo hizo y qué hicieron ellos, sin demeritar nunca lo que cada equipo logró.



### III.2 APORTACIONES

Mi formación profesional académica comenzó con la formación profesional, a pesar de estar en segundo año de la carrera, pues conocer más a detalle cómo me podría desempeñar como profesionista me permitió entender qué esperaba de la carrera y qué estaba buscando para mi formación profesional. De alguna manera tuve la fortuna de aprender en las aulas lo que en ocasiones me enfrentaba al mismo tiempo en el área laboral, por lo tanto, no tenía dificultad, en muchos casos, de entender asignaturas como construcción, administración o instalaciones. Si ocurriera de alguna manera ese enlace, probablemente los alumnos no solo retendrían o entenderían mejor la información, sino que además participarían en la gestión de su aprendizaje de manera más directa y participativa hacia lo que pretenden para sí mismos como arquitectos.

Se ideó entonces este ejercicio para que el alumno interactúe con varios conceptos que está aprendiendo en todos sus demás cursos y relacionarlos con la etapa básica de la

carrera de arquitectura de la facultad de arquitectura en la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, así el alumno relaciona temas de sistemas estructurales, geometría y construcción con el desarrollo de un proyecto que además podrá construir. Con la intención de que no entienda que las demás asignaturas nunca se relacionarán con lo que está plasmando en las clases del Taller Integral.

Y el tema es por demás extenso, un semestre podría tratarse de edificación con mampostería, tocando temas de su evolución como se mostró aquí y terminar con estructuras laminares que son una continuidad de ese desarrollo de estructuras cada vez más extensas y ligeras. Al final un ejercicio práctico queda más grabado en la memoria que todo lo que un profesor pudiera explicar del tema, además que el alumno tiene un acercamiento a lo que es la realidad de la edificación, que todo lo que propones debe tener la calidad suficiente para que se pueda construir.

Cuando me preguntan cómo mejorar su desempeño como arquitectos,

siempre les sugiero buscar experiencia profesional desde la etapa básica, porque así podrán entender el quehacer del arquitecto y orientar lo que buscan para su formación profesional, saber qué quieren y cuáles son sus intereses dentro de las aulas. Este ejercicio cumple un poco esta función pues se enfoca en un trabajo práctico que ellos mismos, en otras asignaturas podrán profundizar si es el caso, definir también si esta carrera les da lo que ellos buscan para su formación. Lo que este ejercicio busca es que, con un ejercicio interactivo, comiencen a entender la logística que va de la mano con la construcción, la necesidad de buscar la mejor solución pues los recursos para la edificación siempre son limitados y que, también es parte de nuestro trabajo como arquitectos, realizar un programa y logística de lo que estamos proyectando.

Sin embargo este tipo de ejercicios no son nuevos y muchas escuelas de arquitectura tienen equipos para realizar y ensayar este tipo de estructuras y es por eso que esta propuesta está pensada para aproximar a los alumnos con el

mínimo de recursos disponibles y el mínimo de infraestructura, por lo que no sólo se podría transpolar un ejercicio similar en otras etapas de la formación del arquitecto sino que además en cualquier escuela de relacionada con las artes, el diseño y la edificación, con temas específicos para abordar, como mencionamos por ejemplo, la evolución de la mampostería y las estructuras de forma activa; las estructuras funiculares y las propuestas constructivas desde la mampostería hasta los textiles.

Se trata de un ejercicio con reglas básicas y con posibilidades muy amplias y sería una manera de que los alumnos vean en estos ejercicios una opción para aprender lo que los arquitectos han desarrollado y cómo aplicarlos a sus proyectos y constatar si la propuesta es satisfactoria no sólo en la entrega del proyecto sino también en la entrega del objeto arquitectónico construido.

## BIBLIOGRAFÍA

- Garcia Olvera J. Tabique. Cuaderno de material didáctico. Taller Ehécatl 21, Año 1, N° 2, facultad de arquitectura, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- Heino Engel. Sistemas de estructuras. Editorial Gustavo Gili s.l. Barcelona, 2006. 1ª edición
- Model Architecture, Francesca Vocialta, Nicola B., Geers K., Zanderigo A., École Polytechnique Fédérale, de Lausanne, Trad.: Autor  
[http://archivesma.epfl.ch/2015/091/vocialta\\_enonce/francesca\\_vocialta\\_enonce.pdf/](http://archivesma.epfl.ch/2015/091/vocialta_enonce/francesca_vocialta_enonce.pdf/)
- Maury Montenegro M., La esencia del árbol, Punto Aparte, Colombia, 2009. 1ª edición
- Ghyka, M. Estética de las proporciones en la naturaleza y en las artes. Editorial Poseidón, Buenos Aires, 1953 Pp 116. Revisión en línea:  
<https://catedrapernautfadu.files.wordpress.com/2017/04/ghyka-matila-estetica-de-las-proporciones.pdf>
- Gregorio García López De La Osa, tutor: dr. Mariano González Cortina, origen y evolución de la cercha
- 17 Rosales Chiquín R, Guía teórica y práctica del curso tipología estructural, guatemala, octubre de 2004, universidad de san carlos de guatemala, facultad de ingeniería,  
[http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_24\\_91\\_c.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_24_91_c.pdf)
- Lyon, A; García R. Forma arquitectónica y estructura a través de la optimización topológica. Nuevos métodos para antiguos problemas. Aus, núm 14 2013, pp 27-30
- Crespo Cabillo, I. Control gráfico de formas y superficies de transición, departament d'expressió gràfica arquitectònica i  
<http://hdl.handle.net/10803/6559>  
<https://pdfs.semanticscholar.org/4c2e/428b390db6288e2804681f1f5ab7bf787c20.pdf>
- Guillermo José J., el diseño estructural por medio de los métodos gráficos,  
<http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/com2004/7-Tecnologia/T-088.pdf>
- Jordi Soler Solà. Barcelona, septiembre de 2013. 'form finding' y fabricación digital en hormigón armado
- [https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/19680/1/jordisoler\\_tfm.pdf](https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/19680/1/jordisoler_tfm.pdf)
- Valdez Olmedo E. Arquitectura textil en México: morfogénesis estructural con membranas flexibles y medios computacionales. División de ciencias y artes para el diseño, uam Xochimilco
- Jordi Soler Solà. Barcelona, septiembre de 2013. 'form finding' y fabricación digital en hormigón armado  
[https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/19680/1/jordisoler\\_tfm.pdf](https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/19680/1/jordisoler_tfm.pdf)
- Moreno A, Tovar Pérez V, Plataforma educativa para Análisis Numérico, realizado con al apoyo del Programa UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO-DGAPA-PAPIME PE105717,  
[https://www.ingenieria.Universidad Nacional Autónoma de México.mx/pinilla/PE105117/pdfs/tema1/1\\_aproximacion\\_numerica\\_y\\_error es.pdf](https://www.ingenieria.Universidad Nacional Autónoma de México.mx/pinilla/PE105117/pdfs/tema1/1_aproximacion_numerica_y_error es.pdf)
- Analysis of thin concrete shells revisited: opportunities due to innovations in materials and analysis methods trad. Autor.  
[Http://homepage.tudelft.nl/p3r3s/msc\\_projects/reportpeerdeman.pdf](http://homepage.tudelft.nl/p3r3s/msc_projects/reportpeerdeman.pdf)

- **cables y arcos:**  
www.farq.edu.uy/estabilidad-  
i/files/2012/02/estructuras\_traccionadas.pdf
- el ladrillo cerámico cocido como materializador de la estructura en la edificación arquitectónica, Jacobo Guillermo J.  
Http://arq.unne.edu.ar/publicaciones/comunicacion/es06/ponencias/jacobo1.pdf
- <sup>39</sup><https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/30402/Estructuras%20laminares.pdf?sequence=1>
- **guía de estudio 8: estructuras neumáticas:**  
<http://www.google.com.mx/url?Sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0cbsqfjaa&url=http%3a%2f%2fwww.tallerdnc.com.ar%2findex.php%2fplan-v%2fnivel-iv%2fdescargas%2fcategoria%2f29-guias-estudio.html%3fdownload%3d360%253agua-de-estudio-nro-8-estructuras-neumaticas&ei=rsajvldzdkm68qhonicidq&usq=afqjcnfykvf0mkxqp2rgb8xiheetl4vylw&sig2=ds8vepq1nnwgcvs0lchz5a&bvm=bv.76247554,d.b2u>
- Actas del sexto congreso nacional de historia de la construcción, Valencia, 21-24 octubre 2009, eds. S. Huerta, R. Marín, R. Soler, A. Zaragoza. Madrid: instituto juan de Herrera, 2009  
<http://trienal.fau.ucv.ve/2008/documentos/tc/TC-18.pdf>
- láminas plegadas de hormigón armado. Realizaciones en España  
[http://oa.upm.es/14931/1/pdf\\_plegadas\\_espa%C3%B1a.pdf](http://oa.upm.es/14931/1/pdf_plegadas_espa%C3%B1a.pdf)
- <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/viewfile/2610/2922>
- Boletín de información técnica n° 266, asociación de investigación técnica de la industria de la madera  
[http://infomadera.net/uploads/articulos/archivo\\_560\\_0\\_2660613.pdf](http://infomadera.net/uploads/articulos/archivo_560_0_2660613.pdf)
- Crespo Cabillo, I. Control gráfico de formas y superficies de transición. Pp. 99
- Vázquez Rodríguez, J. A.; Las barras huecas de madera en la construcción de estructuras espaciales.  
[https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiUwpXHysjLAhUH1SYKHTmhCE8QFggBMAA&url=http%3A%2F%2Fruc.udc.es%2Fdspace%2Fbitstream%2F2183%2F1051%2F3%2FVazquezRodriguez\\_Pepe\\_TD\\_2001.pdf&usq=AFQjCNGcqTHA5FsEzKpV2HQdRkmXIscNCg](https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiUwpXHysjLAhUH1SYKHTmhCE8QFggBMAA&url=http%3A%2F%2Fruc.udc.es%2Fdspace%2Fbitstream%2F2183%2F1051%2F3%2FVazquezRodriguez_Pepe_TD_2001.pdf&usq=AFQjCNGcqTHA5FsEzKpV2HQdRkmXIscNCg)
- La esencia del árbol / Marcel Antonio Maury Montenegro. -- Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Artes