



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA**

Título de la investigación
ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS
*Interpretación de la composición arquitectónica desde la clasificación de los
sistemas estructurales.*

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
DOCTORA EN ARQUITECTURA

PRESENTA:
Mtra. Norma González López

TUTOR PRINCIPAL
Dr. Agustín Hernández Hernández
Facultad de Arquitectura, UNAM.

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR
Dr. Mario de Jesús Carmona y Pardo
Facultad de Arquitectura, UNAM.

Dr. Julián Santoyo García Galiano
Universidad Anáhuac México.

Ciudad de México, marzo de 2025.



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.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS



Tutor:	Dr. Agustín Hernández Hernández	Facultad de Arquitectura, UNAM
Comité tutor:	Dr. Mario de Jesús Carmona y Pardo	Facultad de Arquitectura, UNAM
	Dr. Julián Santoyo García Galiano	Universidad Anáhuac México
Sinodales:	Mtro. Francisco Reyna Gómez	Facultad de Arquitectura, UNAM
	Arq. José Luis Rincón Medina	Facultad de Arquitectura, UNAM

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Con agradecimiento a

A mis padres

A Marianne y Mateo.

A los alumnos.

A todos mis maestros y comité tutor.

“La observación del mundo y sus fenómenos, nos puede llevar a lugares que no sabíamos que existían”.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Índice

	Páginas
Introducción.	8
Planteamiento del problema	10
Hipótesis	11
Metodología	12
Objetivos	15
Marco teórico	17
Capítulo 1 – Conceptos básicos sobre sistemas estructurales.	22
1.1 Análisis y diseño estructural.	23
1.2 Elementos y sistemas estructurales.	29
1.3 Diferencia entre sistema estructural y sistema constructivo.	31
Ejemplo. Palacio de minería.	33
Ejemplo. Posgrado de Economía UNAM.	34
Conclusión del capítulo 1.	40
Capítulo 2.-Clasificación de los sistemas estructurales.	41
2.1 Clasificación de estructuras pesadas y ligeras.	42
2.2 Clasificación de estructuras de Charleson.	43
2.3 Clasificación de estructuras de Heino Engel.	45
2.3.0 Taxonomía de los sistemas estructurales de Heino Engel.	48
2.3.1 (FA) Estructuras de Forma Activa.	49

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

FA1. Estructuras de Cables.	49
FA 2. Estructuras de Forma de Tienda.	51
FA 3. Estructuras Neumáticas.	51
FA 4. Estructuras de Arcos.	52
2.3.2 (VA) Estructuras de Vector Activo.	56
VA 1. Estructura de Armadura Plana	56
2.3.3 (SA) Estructuras de Sección Activa.	61
SA1. Estructuras de Vigas.	64
SA2. Estructuras de Pórticos.	66
SA3. Retícula de Vigas.	69
2.3.4 Estructuras de Superficie Activa (SUA).	70
SUA1. Estructuras de Láminas.	71
SUA2. Estructura de Lámina Plegada.	72
SUA3. Estructura de Membrana.	73
2.3.5 (AA) Estructuras de Altura Activa.	75
Rigidización Lateral.	75
Conclusiones del capítulo 2	83
Capítulo 3.- Estructuras arquitectónicas.	84
3.1 Definición de Estructuras Arquitectónicas.	85
3.2 Definición de Estructuras Convencionales.	85
3.3 Distinción entre Analista y diseñador de estructuras.	86
3.4 Planteamiento oportuno de las Estructuras Arquitectónicas.	87

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

3.5 La estructura que da la Forma Arquitectónica.	90
3.6 Características de las Estructuras Arquitectónicas.	92
3.7 El planteamiento Estructural.	94
3.8 El complejo sistema de cálculo de la Ingeniería Sísmica.	95
Conclusiones del capítulo 3.	101
Capítulo 4.- La composición arquitectónica desde los sistemas estructurales.	102
4.1 El proceso de diseño del objeto Arquitectónico.	103
4.2 Conceptos de didáctica. Interacciones didácticas.	110
4.3 Metodología MOOA para las estructuras arquitectónicas.	113
Fase Preliminar. Estudio del Contexto.	116
Primera Fase. Estudio de Casos Homólogos.	117
Segunda Fase. Experimentación.	118
Tercera Fase. Propuesta de diseño arquitectónico y estructural.	120
4.4 Secuencia de la Metodología MOOA.	121
4.5 Rúbrica para evaluar las Estructuras Arquitectónicas.	127
4.6 Las Estructuras Arquitectónicas como creadoras de espacios.	130
Conclusiones del capítulo 4.	132
Capítulo 5- Casos de Estudio.	133
5.1 Caso de Estudio 1. Crown Hall por Mies Van de Rohe.	134
5.2 Caso de Estudio 2.- BUNJIL PLACE. Por FJMT.	141

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

5.3 Caso de Estudio 3.- Centro de Diseño Sharp-Ontario. College of Art & Design. Por ROBBIE / YOUNG + WRIGHT ARQUITECTOS, WILL ALSOP.	151
Conclusiones del capítulo 5.	166
Conclusiones y aportaciones.	167
Referencias bibliográficas.	177

INTRODUCCIÓN

Se ha observado a través de la cátedra que suele impartirse en las materias de estructuras y diseño arquitectónico, que el estudiante de arquitectura tiende a considerar de manera separada los ámbitos de las diferentes disciplinas, Estructura y Arquitectura. Esta observación realizada también en la universidad de California State Polytechnic University, Pomona, United States, derivó en un nuevo modelo educativo, en un proyecto de último año para brindar a los estudiantes de Arquitectura, Ingeniería Civil y Construcción, una experiencia profesional integral, en línea con las tendencias contemporáneas de integración de varias disciplinas en la construcción. El objetivo principal del modelo propuesto fue fomentar los beneficios potenciales que surgen de objetivos educativos compartidos entre diferentes áreas técnicas.

Este interesante modelo se plantea desde el aula, y coincide con la misma experiencia realizada por los profesores que imparten las materias de estructuras a arquitectos, porque es ahí en donde se notan con claridad las necesidades de integrar las disciplinas de ingeniería y arquitectura.

Es de conocimiento en el medio profesional y académico, el cisma existente entre las disciplinas de Arquitectura e Ingeniería.

El presente trabajo se originó durante mis estudios en la maestría en diseño arquitectónico realizados en el posgrado de arquitectura, poniendo como contexto que mi profesión de formación es de ingeniera civil, y que el objetivo de estudiar dicha maestría era tratar de comprender este cisma entre las profesiones de ingeniería y arquitectura. Mientras ejercí la profesión de ingeniería, experimenté al igual que muchos colegas, lo difícil que resulta dialogar entre las dos profesiones. Se decidió abordar esta comprensión entre la estructura y la arquitectura desde la academia, por lo que el trabajo de tesis de la maestría lleva por nombre: "Intersticios entre Ingeniería Civil y Arquitectura" y como continuación a dicha tesis, se vislumbró una potencialidad en este acercamiento desde los sistemas estructurales, que se aborda en este trabajo. Toda vez que, durante la maestría, se logró comprender el proceso de conceptualización del objeto arquitectónico, y entender que el proceso creativo de un proyecto arquitectónico culmina con la materialización de este y en muchos casos durante este proceso es en donde se pierde el sentido original del mismo proyecto, debido al problema que se enfrenta el diseñador al incorporar el sistema estructural.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Este trabajo de investigación dio como resultado Las *estructuras arquitectónicas* que suelen incorporar elementos prácticos de diseño estructural y diseño arquitectónico, derivado de un amplio estudio de casos y un planteamiento metodológico cualitativo, para lograrlo se plantea un nuevo modelo metodológico de enseñanza llamado MOOA, Metodología de la observación del objeto arquitectónico y su inter- Acción.

Estas estructuras arquitectónicas, aún no se han definido teóricamente como metodología de enseñanza en el transcurso de la historia de la arquitectura, sin embargo, se observa que existe en el ámbito profesional, la búsqueda de respuestas a las necesidades de incluir la estructura como elemento arquitectónico. En la presente investigación se hará referencia a obras del siglo XX y XXI. Ejemplo de ello es la colaboración de ingenieros y arquitectos para lograr obras emblemáticas, como la colaboración de Cecil Balmond (2008) y Rem Koolhaas en la Serpentine Gallery Pavilion 2006. Consiste en una colosal bóveda inflable de forma ovoide que parece flotar sobre el césped del parque: una 'burbuja' dispuesta a modo de cubierta sobre un espacio circundado por un anillo de paneles translúcidos de policarbonato.

Poco se sabe de su proceso de diseño y su proceso de cálculo. La información que se generó durante esta colaboración queda fielmente resguardada por los despachos de arquitectura y de ingeniería. Una pregunta que engloba este trabajo es: ¿Cómo se puede generar este conocimiento desde las aulas? ¿Cómo pueden los estudiantes de arquitectura hacer esta colaboración entre estructura y arquitectura?

Planteamiento del problema

Este trabajo estudia la problemática, a la que los estudiantes y docentes de la licenciatura de arquitectura se enfrentan en su quehacer cotidiano: la de integrar la estructura y el proyecto arquitectónico desde la composición del proyecto arquitectónico y sobre la enseñanza de las estructuras en las aulas de las escuelas de arquitectura.

¿Es posible que los estudiantes y docentes de arquitectura logren la integración de los sistemas estructurales durante el proceso de diseño arquitectónico a través del modelo metodológico MOOA?

Este planteamiento de la problemática resalta la importancia de las siguientes preguntas de investigación en el contexto académico y asegura que esta pregunta se sitúe dentro de un marco teórico que respalda su validez y relevancia.

- ¿Es posible que aplicando el modelo pedagógico de interacciones didácticas se pueda resolver la problemática de enseñanza-aprendizaje de las estructuras en las aulas de las escuelas de arquitectura?
- ¿Se puede proponer una metodología para que el proyecto no sufra modificaciones en su concepto, intención y habitabilidad, al incorporarse la estructura?
- ¿Es posible elegir y evaluar cualitativamente a la estructura durante el ante proyecto antes de concluir el diseño arquitectónico?
- ¿Es posible que el cambio en el proceso de diseño del objeto arquitectónico despliegue un nuevo concepto llamado Estructuras Arquitectónicas?
- ¿Es posible hacer una lectura de las formas arquitectónicas desde su interior, a través de los sistemas estructurales?

Esta situación que es plenamente identificada por varios profesionales del campo de conocimiento y por los estudiantes de arquitectura, ha sido abordada con profundo interés desde diversas perspectivas. En este trabajo se aborda dicha situación desde dos líneas de investigación, la primera desde una propuesta metodológica de la enseñanza de las estructuras llamada MOOA, tanto para estudiantes como para docentes de arquitectura, y la otra es la identificación y propuesta de las llamadas “Estructuras Arquitectónicas”.

Se aborda también la problemática desde la docencia, de la enseñanza de las estructuras en las aulas de la Licenciatura de Arquitectura, en donde se enseñan métodos de cálculo que no tienen sentido para la integración con el diseño arquitectónico. ¿Cómo puede el estudiante de la Licenciatura de Arquitectura, estructurar sus proyectos

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

arquitectónicos con una metodología didáctica que permita que la estructura del proyecto sea parte de su solución integral?

¿Cómo se puede replicar en la academia lo que ya realizan algunos de los grandes despachos de Arquitectura en la vida profesional?

Hipótesis.

Esta propuesta conceptual se basa en la hipótesis de que, al incorporar desde una fase inicial el estudio del análisis y diseño estructural durante el proceso del diseño arquitectónico, contribuirá a crear una propuesta formal del proyecto desde la concepción de los sistemas estructurales, porque si no se tiene un conocimiento estructural, el diseño arquitectónico va a ser deficiente. El arquitecto no va a poder resolver un buen espacio donde se dé la vida de los seres humanos, si no puede materializarlo.

Es decir que, si es posible poder identificar los diferentes sistemas estructurales, entonces al poder descifrar las características estructurales que hacen posible materializar el proyecto arquitectónico, permitirá anticipar la idea estructural del proyecto arquitectónico. Logrando que la intención del objeto surja con una idea clara de su sistema estructural.

En la figura 1 se observa que el sistema reticulado de vigas, se puede configurar ya sea en forma ortogonal u oblicua, siendo viables ambos desde la perspectiva estructural, pero cada sistema, otorga una configuración espacial diferente para la intención arquitectónica, esta identificación de las características estructurales que permiten materializar el concepto arquitectónico, evocan con anticipación la idea estructural del mismo proyecto, llamándose a esta anticipación de la estructura formal, estructuras arquitectónicas.

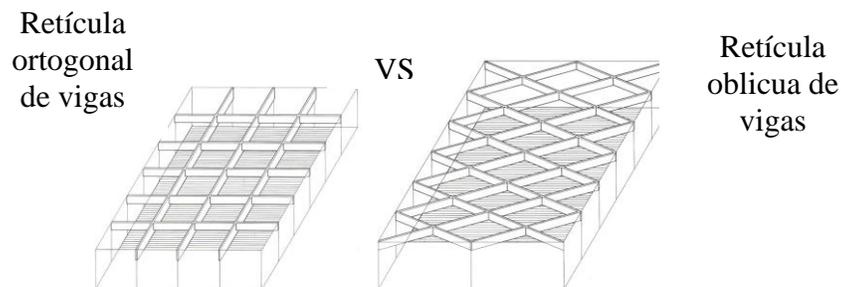


Fig. 1 que muestra la disposición de diferentes sistemas de vigas en cubierta otorgando diferentes configuraciones espaciales para las intenciones arquitectónicas. (Imagen propia)

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Sin embargo, durante el proceso de investigación fue necesario identificar cuáles eran las características de estas llamadas estructuras arquitectónicas, y al caracterizarlas, surgió evidencia de edificios que ya han sido construidos con la idea de incorporar el sistema estructural como concepto arquitectónico, por lo que se estudian obras con estas características.

En esta tesis, se plantea la teoría de que, desde el estudio de los sistemas estructurales y no desde el cálculo, el alumno puede acercarse a un desarrollo integral de su formación y elaborar proyectos que en su composición contemplen las formas que otorgan diferentes configuraciones espaciales.

Metodología.

Este trabajo propone la metodología que combina enfoques cualitativos y participativos, con un fuerte componente de análisis contextual y evaluación práctica.

En donde el alumno a través de la observación y estudio de casos interactúe con el objeto real, aplicando la pedagogía de las interacciones didácticas.

1.- Diseño de la Investigación

- Enfoque Metodológico: Cualitativo, con un enfoque fenomenológico y exploratorio.
- Método: Investigación-acción participativa (IAP), que permite a los participantes (estudiantes y docentes) involucrarse activamente en la implementación y evaluación del modelo MOOA.

2.- Diseño e Implementación del Modelo MOOA

-Objetivo: Implementar el modelo MOOA en un entorno controlado definido como un curso específico aplicado por otros profesores para evaluar su efectividad.

- Instrumentos:

-Talleres de Co-Diseño: Estudiantes y docentes colaboran en la creación de proyectos arquitectónicos en donde los sistemas estructurales son integrados desde el inicio usando el modelo MOOA.

- Diarios de Campo: Los participantes registran sus experiencias, reflexiones y dificultades durante el proceso de implementación del modelo.

3.- Evaluación y Análisis

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

- Objetivo: Evaluar la efectividad del modelo MOOA en mejorar la percepción y comprensión de los sistemas estructurales en la composición del diseño arquitectónico.

- Instrumentos:

- Análisis Temático: Identificar patrones y temas recurrentes en las entrevistas, grupos focales y diarios de campo.

- Evaluación de Proyectos: Análisis comparativo de proyectos arquitectónicos desarrollados antes y después de la implementación del modelo MOOA, considerando la calidad de la integración de los sistemas estructurales.

4.- Retroalimentación y Ajustes

- Objetivo: Refinar el modelo MOOA basado en los hallazgos y la retroalimentación de los participantes.

- Instrumentos:

- Revisión Crítica: Los estudiantes y docentes revisan el modelo y sus resultados académicos, proponiendo mejoras y ajustes.

- Reuniones de Reflexión: Discusiones abiertas sobre la experiencia de implementación, enfocadas en identificar áreas de mejora y buenas prácticas académicas.

5.- Validación de Resultados

- Objetivo: Validar la aplicabilidad y efectividad del modelo MOOA en otros contextos educativos.

- Instrumentos:

- Estudios de Caso Comparativos: Implementación del modelo en diferentes instituciones o cursos, comparando los resultados.

- Publicaciones y Presentaciones: Compartir los resultados en congresos académicos y publicaciones para recibir retroalimentación de la comunidad académica.

6.- Conclusiones y Recomendaciones

- Síntesis de Hallazgos: Resumen de los principales hallazgos sobre la percepción y experiencia sobre la integración de sistemas estructurales.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

- Recomendaciones: Propuestas para la incorporación del modelo MOOA en el currículo de arquitectura y su potencial adaptación a otras disciplinas.

Esta metodología permite no solo evaluar el impacto del modelo MOOA, sino también adaptarlo continuamente en función de las experiencias reales de los estudiantes y docentes, asegurando que la integración de los sistemas estructurales se realice de manera efectiva y significativa durante el proceso de diseño arquitectónico.

OBJETIVOS

1.- Motivar al alumno de arquitectura a que incorpore el conocimiento adquirido del estudio de los sistemas estructurales como parte del proceso del diseño arquitectónico.

2.- Conocer la clasificación de sistemas estructurales durante la interpretación de la composición arquitectónica para poder complementar dichos conceptos y a partir del análisis de los principios estructurales se den respuestas formales y mecánicas en algunos objetos de diseño, deduciendo pautas de interpretación y composición arquitectónica.

3.- Explicar y demostrar durante el transcurso del trabajo, la importancia que tiene la incorporación de conocimientos básicos estructurales adquiridos al momento de generar la primera idea del proyecto arquitectónico para el beneficio intrínseco del mismo.

4.- Proponer la metodología de interacciones didácticas nombrada MOOA basada en la observación de los objetos y su interacción con ellos, de ahí su nombre; Metodología de Observación de Objetos y su inter-Acción diseñada bajo criterios de pautas teóricas y de principios estructurales. Por lo que se dedica un capítulo para estudiar los sistemas estructurales y otro capítulo a estudiar las teorías tanto de la didáctica como del diseño arquitectónico que pueda “ser aplicada” por los alumnos y docentes de arquitectura durante el desarrollo de sus proyectos arquitectónicos para que la estructura se integre desde un inicio en el proceso de diseño

5.- Conocer el funcionamiento de las diferentes fuerzas que actúan en los sistemas estructurales:

Sistemas estructurales de sección activa (formadas por barras, losas, muros, etc.), cuya geometría es plana, por lo que predominan esfuerzos de flexión.

Sistemas estructurales de forma activa, como:

- Los arcos, que están diseñados para soportar cargas verticales principalmente mediante compresión axial.
- Las estructuras tensadas utilizan cables como medios principales de soporte, debido a que los cables presentan una alta resistencia a tracción, pero ninguna a compresión o flexión, deben trabajar estrictamente a tracción.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

- Estructuras de cúpulas, una cúpula es similar a un arco girado, excepto en que se desarrollan fuerzas anulares que son de compresión cerca de la clave y de tracción en la parte inferior o arranque.

Estructuras de superficie activa, como:

- Las láminas plegadas. Las estructuras de láminas plegadas están compuestas de elementos delgados y anchos unidos rígidamente a lo largo de sus bordes formando ángulos marcados para arriostrarse mutuamente frente al pandeo lateral.
- Las mallas espaciales son retículas estructurales tridimensionales basadas en la rigidez de la triangulación de elementos lineales que solo están sometidos a esfuerzos axiales, de tracción o compresión.
- Las estructuras de membranas son estructuras de láminas delgadas y curvas que se realizan habitualmente en concreto armado para formar las cubiertas de edificios. Su forma permite transmitir las cargas aplicadas en forma de tensiones de membrana; es decir, tensiones de compresión, tracción y cortante que actúan dentro de la superficie.

En el curso de la investigación se llegó a la conclusión de analizar con mayor profundidad un sistema estructural: los sistemas de sección activa. Esto con el propósito de otorgar herramientas a los alumnos de arquitectura durante el desarrollo de sus proyectos arquitectónicos y poder limitar el presente trabajo; así como proporcionar herramientas de estudio a futuras investigaciones que contribuyan en el campo de sistema de vector activo, forma activa, superficie y altura activa.

MARCO TEÓRICO

Esta investigación se aborda desde tres áreas de estudio:

- a) La clasificación de los sistemas estructurales,
- b) La teoría del diseño arquitectónico y
- c) Las metodologías didácticas.

Los trabajos de investigación existentes en torno al tema sobre “el proyecto arquitectónico” y “la vinculación de las estructuras”, denotan la necesidad actual de incursionar en un campo formal en la incorporación de diversos temas por el momento distantes entre sí. En la figura 2 se muestran los componentes que se estudian para hacer posible su interacción.

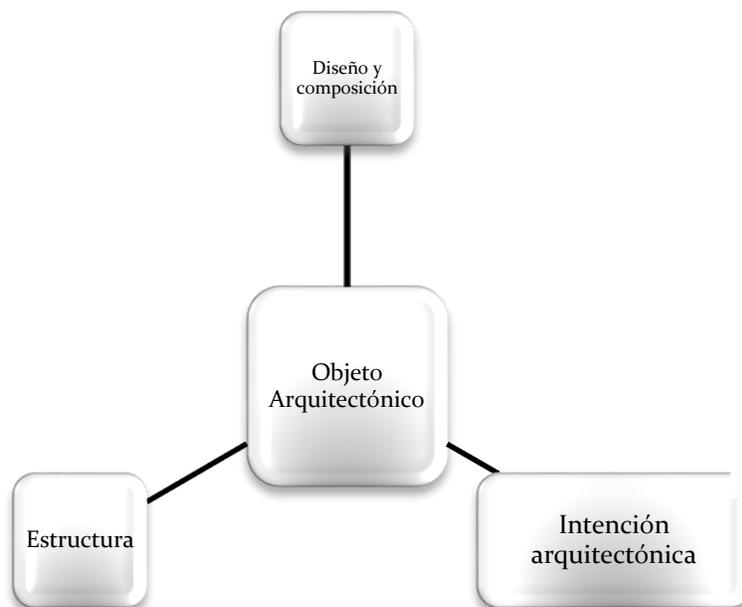


Fig. 2 Una mirada global de la interacción entre diferentes componentes que hacen posible el objeto arquitectónico. (Imagen propia)

A comienzos del siglo XIX, en el contexto de la revolución industrial, las teorías racionalistas empezaron a influir en el diseño arquitectónico, generando un vínculo teórico entre el pensamiento racional y la práctica arquitectónica. Esta conexión condujo al desarrollo de

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

edificaciones que reflejaban los avances en procesos constructivos, tecnología, métodos de cálculo basados en elementos finitos y la introducción de nuevos materiales como el hierro. La adaptación de estas ideas se manifiesta en las obras de destacados arquitectos como Viollet LeDuc en el siglo XIX y Le Corbusier en el siglo XX. Estos arquitectos reflejaron los principios racionalistas del siglo XVIII al expresar la idea de que las formas arquitectónicas surgen naturalmente a partir del sistema estructural empleado.

Viollet LeDuc y Le Corbusier adoptaron esta perspectiva al diseñar, enfatizando la importancia de la coherencia entre la estructura y la forma en sus obras. Esta visión implica que el diseño arquitectónico es una manifestación directa del sistema estructural, y cualquier cambio en este último requiere ajustes correspondientes en las formas arquitectónicas.

Viollet Leduc¹, tenía conocimiento de la arquitectura gótica debido a su experiencia en restauración, para Leduc el medioevo no es la edad oscura normalmente descrita, es en cambio un periodo de recursos y de estudios técnicos, Viollet Leduc observó la estructura y los recursos a través de la experiencia, y es lo que en este trabajo se rescata, es decir, observar las estructuras de los edificios ya construidos y crear una narrativa o un lenguaje arquitectónico partiendo de la estructura. Por lo que una de las bases de la metodología MOOA es la observación.

Adicionalmente al marco del diseño arquitectónico, existe el marco Normativo. En México, existe una profunda inquietud ante diversas solicitudes en el diseño de estructuras por parte de la ingeniería, investigaciones en el área de diseño han ido modificando los reglamentos y con ello el diseño arquitectónico. Por lo que en este trabajo la ingeniería sísmica se aborda desde la comprensión del funcionamiento del sistema estructural para lograr incorporarlo en la intención de la composición arquitectónica.

La seriedad de este tema se debe a la experiencia que se ha tenido en México y en ciudades catalogadas como sísmicas ante eventos sísmicos de gran magnitud, en donde se demostró que los edificios no resistieron como se esperaba.

Eventos sísmicos registrados en los últimos años, como los de México 1985 y 2017, Chile 2010, Japón 2011, Northridge 1994, Kobe 1995 y Taiwán 1999, entre otros, han dejado de manifiesto la necesidad de mejorar las metodologías de diseño sísmico de estructuras, ya que una cantidad importante de edificios diseñados conforme a códigos sísmicos modernos no exhibieron un comportamiento adecuado durante dichos eventos, por tal motivo, la comunidad internacional de ingenieros estructurales está actualmente intentando mejorar

¹ De Fusco, Renato (1992): Historia de la Arquitectura Contemporánea. Madrid: Celeste Ediciones, págs. 59-62.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

el diseño sísmico de edificios mediante la formulación de metodologías de diseño, cuyo objetivo es el control del daño estructural a través del control de los desplazamientos (Moehle 1992, Priestley 2000)

Esto se puede ilustrar de las recomendaciones y conclusiones derivadas del Simposio Internacional sobre Metodologías de Diseño Sísmico para la Siguiete Generación de Códigos (Fajfar y Krawinkler 1997).

A partir de estas recomendaciones, los reglamentos hacen una distinción entre formas regulares y formas irregulares. Se observó que las edificaciones definidas como irregulares, no se comportaron de forma adecuada durante el sismo. Esto no significa que las edificaciones irregulares se prohibieron, sino que se reforzaron los límites de servicio y se obligó a diseñarlos por métodos dinámicos lineales y no lineales. Se incorporan además para el año 2023, métodos por resiliencia. Los métodos estáticos lineales se limitaron para estructuras regulares.

En entrevista con el Dr. Meli², se expresan más inquietudes en torno a la seguridad estructural. Definiendo más claramente el papel que juegan las estructuras en la seguridad de un edificio, pero sobre todo si hacemos una lectura desde la arquitectura.

RDU: ¿Quiere decir que una estructura que no cumple con estos aspectos generales es la que se cae durante un sismo?

RMP: Esencialmente sí. Un requisito básico que deben cumplir todas las estructuras es que hayan seguido estrictamente las normas, los reglamentos de construcción, las normas de edificación, las normas para la calidad de los materiales y la buena ejecución de la estructura. Es todo un conjunto de normas, de buenas prácticas que deben seguirse y cumplirse. Podemos decir que, en general, las estructuras que han seguido esas normas no corren riesgos importantes de colapso o de graves daños. En 1985 fallaron las estructuras, ya sea que habían sido construidas antes de que existieran unas normas modernas en el país, o que tenían algunos defectos, algunas características que las hacían más vulnerables que las otras. **Pero también hay que reconocer que había estructuras que, aunque habían seguido los reglamentos, también tuvieron daños porque la resistencia que los reglamentos de aquel entonces exigían a las estructuras demostró ser insuficiente.** Por eso una de las primeras medidas que se tomaron al cambiar la reglamentación, fue exigir mucha más capacidad a las estructuras, que los edificios tuvieran una estructura más robusta que la que antes exigían las normas” (Meli 2010).

Se deduce que si el Dr. Meli menciona que las Normas del pasado no fueron las adecuadas para resistir los sismos de 1985, las Normas actuales, pueden no ser las adecuadas para

² Meli, Roberto. (2010): Revista Digital Universitaria. 1 de enero de Volumen 11 Número 1 • ISSN: 1067-6079. Coordinación de Publicaciones Digitales. DGSCA-UNAM

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

que los edificios resistan sismos en el futuro. Actualmente existen formas irregulares arquitectónicas que se construyen cumpliendo estrictamente el reglamento, véase como ejemplo La torre Virreyes ubicada en Bosque de Chapultepec, Pedregal 24 junto al, Molino del Rey, 11000 Ciudad de México, pero que, en un futuro no muy lejano, debido a la rapidez con la que avanza la ciencia, podrían estar fuera de reglamento e incluso no resistir eventos sísmicos aún no estudiados.

En cuanto al Marco teórico referente a la comprensión de la necesidad de integrar las estructuras con el diseño arquitectónico, existen investigaciones que han sido más abundantes en el siglo XXI, véase “La estructura como arquitectura”³, un libro que se acerca a un entendimiento más claro entre la estructura de edificación y el diseño arquitectónico. Aquí el autor estudia las posibilidades que tiene la estructura para enriquecer la arquitectura. Lo que busca el autor es que los arquitectos perciban la estructura como un elemento integral de la arquitectura antes que como una simple técnica aplicada. Se ilustran numerosos ejemplos, que ayudan a su cometido. Sin embargo, no cuenta con una metodología o no recomienda una clasificación que ayuden al alumno a formar un criterio a la hora de tomar decisiones sobre el diseño del proyecto integral, lo relevante de este trabajo, es que el autor es Ingeniero Civil dedicado a impartir materias de estructuras a estudiantes de Arquitectura en la Universidad de Wellington School of Architecture

En el libro “La estructura en el diseño arquitectónico”, T.Y Lin y Sydney⁴ definen que, debido a la tecnología moderna, las áreas de competencia de los diseñadores de arquitectura e ingeniería se han vinculado. A causa de ello, la arquitectura debe ser el producto de la colaboración creativa de arquitectos e ingenieros” (Lin Sydney 1991). Los autores muestran un indicio de la imperiosa necesidad existente de integrar la estructura al proyecto, este antecedente se suma a otros autores del siglo XX que muestran la necesidad, sin embargo, hasta la fecha no se ha logrado definir un camino que lleve paulatinamente al destino deseado: Integrar la estructura desde la concepción del proyecto y no al final.

En el contexto actual, las Universidades suelen formar a los estudiantes en las materias de estructuras como una materia separada del proyecto. Se estudian las técnicas de cálculo, de diferentes sistemas constructivos, lo que impide que los estudiantes de arquitectura

³ Charleson, A. (2007). *La estructura como arquitectura. Formas, detalles y simbolismo*. Barcelona: Reverté, SA. Cubillos, A. (s.f.). Introducción al método de elementos finitos. *Universidad de Ibagué*. . Nervi. (s.f.).

⁴ T.Y Lin, Sydney D. Stotesbury. (1991) “Conceptos y sistemas estructurales para arquitectos e ingenieros”. Ed. Limusa. 1991. Pág. 15.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

participen activamente en el diseño de estructuras, con el fin de dar vida a sus ideas y proyectos.

Cuando la estructura aporta un valor arquitectónico más allá de su función primordial de resistir cargas, agrega una capa adicional de funcionalidad y estética al proyecto, incrementando el interés y disfrute de los edificios, mejorando su funcionalidad y habitabilidad.

CAPÍTULO 1
Conceptos básicos sobre sistemas
estructurales.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

1.1 Análisis y Diseño estructural.

Para poder incorporar el sistema estructural durante el proceso de diseño, se requiere investigar las diferentes clasificaciones de sistemas estructurales.

Al revisar diversas investigaciones, se encuentra que existen numerosas clasificaciones de sistemas estructurales y coinciden en que la función del proyectista es concebir la estructura ideal para una función especial, enfrentándose a un trabajo exhaustivo.

Con el fin de avanzar de manera gradual con el enfoque de este trabajo se abordan dos definiciones:

Estructuras convencionales y Estructuras arquitectónicas.

a) Las estructuras convencionales. Son definidas en este trabajo como las estructuras que son creadas a partir de un proyecto arquitectónico ya definido. Es decir, la estructura trata de adaptarse al proyecto y trata de solucionar estructuralmente al proyecto arquitectónico, durante una fase del proyecto definida como estructuración.

b) Las estructuras arquitectónicas. Se definirán como las estructuras que son concebidas desde un inicio y en conjunto con el proyecto arquitectónico. Mediante una metodología planteada en este trabajo. Es decir, la estructuración del proyecto arquitectónico queda definida bajo los criterios de diferentes configuraciones estructurales, antes de hacer un planteamiento final del conjunto arquitectónico.

Más adelante se hará una descripción más detallada sobre ambos tipos de estructuras.

Para contestar la pregunta ¿Es necesario tener conocimientos de cálculo para lograr hacer un planteamiento estructural? Es importante explicar qué es el cálculo.

Se partirá del conocimiento, de que todas las estructuras suelen calcularse con una teoría de diseño específica, pero siguiendo los tres pasos fundamentales en todo proceso de cálculo:

1.- Análisis de cargas

2.- Análisis estructural

3.- Dimensionamiento de elementos a través de diferentes teorías del diseño estructural, incluyendo el diseño por sismo y viento, etc.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Cabe mencionar el estudio realizado por Mariano Vázquez⁵, en donde incorpora la distinción entre análisis de estructuras y diseño de estructuras:

“...Más importante aún es reconocer que el método 'elástico' y el 'plástico' responden a propósitos muy diferentes y que esa diferencia arroja más luz sobre la distinción entre las dos comunidades de pensamiento que cualquier otra consideración: el método 'elástico' sirve para comprobar un diseño (y sus practicantes son propiamente 'analistas'), mientras que el cálculo plástico sirve para proponer reglas de diseño (y es practicado por 'diseñadores'). De este modo no parece exagerado distinguir entre dos disciplinas o formas de conocimiento diferentes: el análisis de estructuras (el conocimiento de cómo se comporta una estructura bajo carga) y el diseño de estructuras (el conocimiento de qué estructura se requiere para sostener un conjunto de cargas). El analista intenta 'ver' cómo tiene que deformarse la estructura ('mínima energía potencial'), allí donde el diseñador intenta 'ver' cómo deben conducirse las cargas hacia el suelo ('mínima cantidad de estructura'). Desde luego, nada impide la existencia de un diseñador/analista, pero desempeñar ese doble papel parece esencialmente más difícil” (Vázquez 1997).

Siguiendo las consideraciones de Vázquez nos encontramos ante dos casos, primero identificar qué tan necesario es que un arquitecto incluya en su formación las dos vertientes, tanto el análisis como el diseño, y en segundo lugar en qué cantidad y hasta qué punto se deben incluir los conceptos que acrediten el conocimiento del análisis y diseño. Se intuye también que el diseño plástico es el que puede proporcionar un acercamiento a las estructuras arquitectónicas y por consiguiente a un detallado y creativo estudio de los sistemas estructurales para lograr comprender “qué estructura se requiere para sostener un conjunto de cargas”. Cuando en el proceso del diseño arquitectónico se identifican estas diferencias, se logra un acercamiento a la comprensión de las estructuras arquitectónicas.

En la figura 1.1 se analiza un ejemplo de una viga simplemente apoyada para comprender este concepto.

⁵ Vázquez, Mariano (1997): Sobre la enseñanza y práctica de la teoría de estructuras. Dpto. de Estructuras de Edificación. Univ. Politécnica de Madrid. Revista: Informes de la Construcción, Vol. 49, n° 449.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

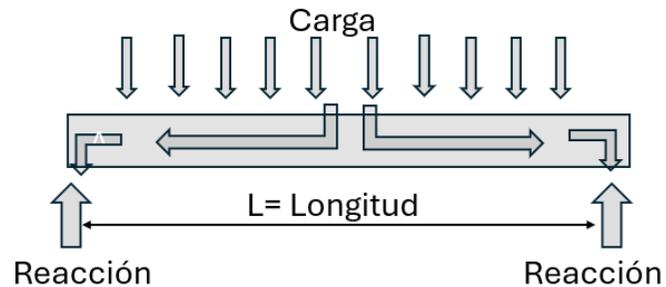


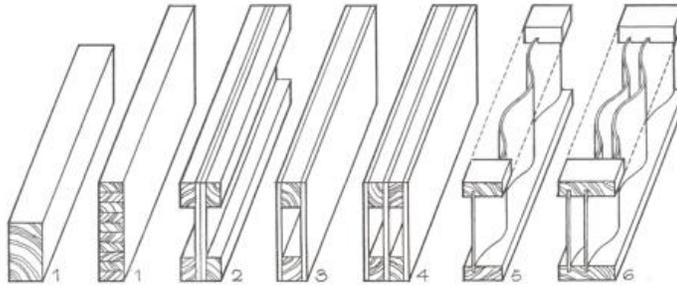
Fig. 1.1 que muestra el mecanismo de viga apoyada en sus extremos y que recibe un sistema de cargas verticales. (Imagen propia)

Mecanismo de Viga: transmisión de fuerzas mediante la sección del material, es decir, la sección de una viga de madera tendrá diferentes dimensiones que la sección de una viga de acero, que una viga de concreto, etc.

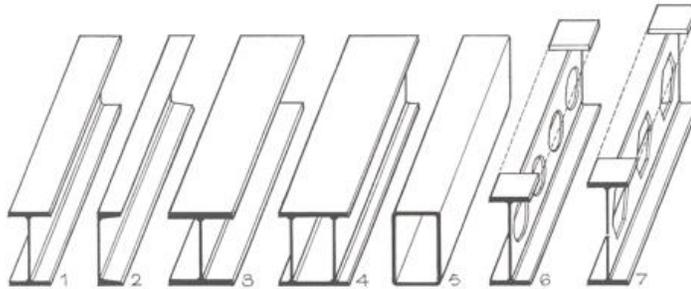
La sección es lo que permite que el mecanismo de viga cumpla su función, el material es lo que defina sus dimensiones y la forma de su sección. En la figura 1.2 se muestran diferentes secciones de vigas de acuerdo con el material.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Madera



Acero



Concreto

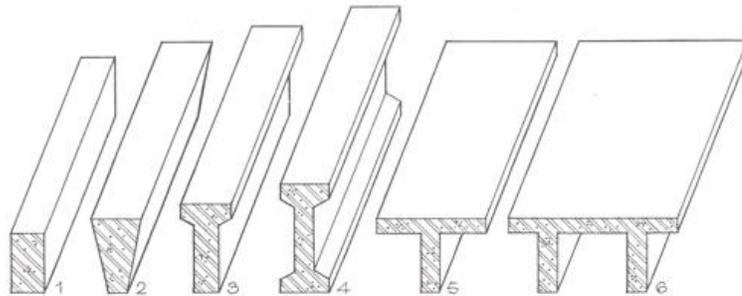


Fig. 1.2 que muestra las diferentes secciones típicas de una viga en dependencia del material. (Imagen propia)

En la figura Fig. 1.3 se muestra el funcionamiento de una viga al recibir una carga. La viga por su naturaleza de ser un componente horizontal tendrá que resistir esfuerzos de cortante y de momento. Después de conocer cómo se transmiten las cargas a través de este sistema, se puede realizar el *análisis de la estructura* (interpretar cómo se comporta una estructura bajo carga), en este caso, la viga se encuentra simplemente apoyada por lo que su momento en el apoyo es cero y su momento máximo se encuentra al centro del claro, mientras que su esfuerzo cortante máximo se encuentra en el apoyo y en el centro del claro el cortante resulta cero.

En la sección suceden esfuerzos de compresión máximos por el lecho superior y de tracción máximos en el lecho inferior.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

En el eje neutro, (que en las vigas rectangulares suele estar a la mitad), no existen esfuerzos ni de tensión, ni de compresión.

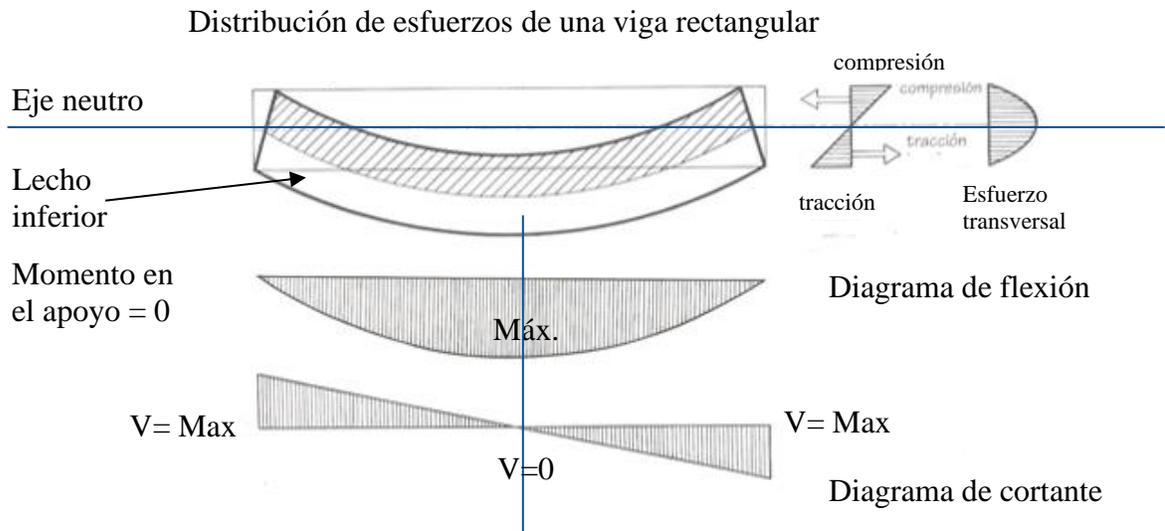


Fig. 1.3 que muestra los diagramas frecuentes en el análisis y diseño de vigas. (Imagen propia)

Por lo que al conocer cómo se comporta la estructura bajo la carga, se podrá hacer un planteamiento del *diseño estructural*, el conocimiento de qué estructura se requiere para sostener un sistema de cargas (Vázquez 1997).

En la figura 1.4, se ilustra el diseño de la estructura para diferentes tipos de apoyo, lo que significa, que, para cada tipo de apoyo, la estructura tendrá un comportamiento y un *diseño diferente*.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

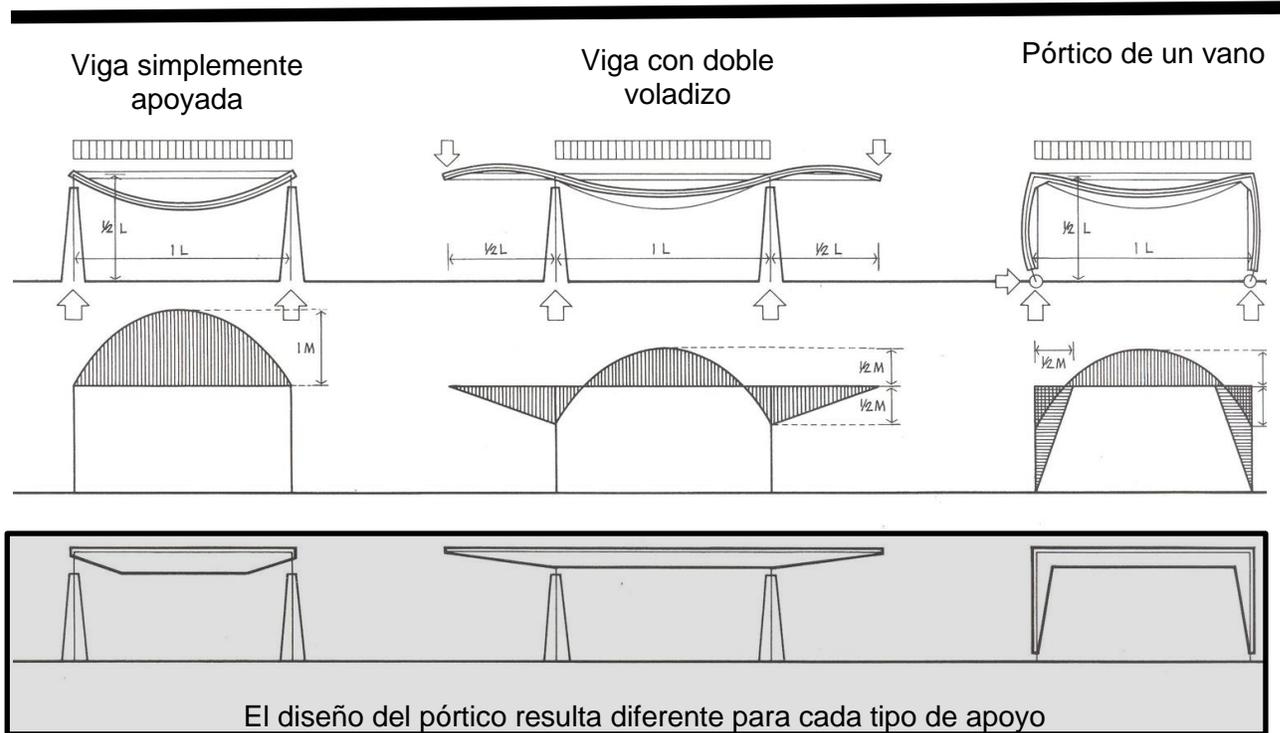


Fig. 1.4 que muestra los diferentes diagramas de vigas con distintas condiciones de apoyo, su comportamiento estructural y su relación con la composición arquitectónica.

(Adaptada de Engel, 2003, GG)

La serie de diagramas anteriores muestra que la razón de ser del diseño y forma del pórtico, la cual responde al conocimiento de cómo se comporta una estructura bajo la carga.

En su libro, Heino Engel⁶ clasifica en 5 tipos los sistemas estructurales.

- 1.- Forma Activa
- 2.- Vector Activo
- 3.- Sección Activa
- 4.- Superficie Activa
- 5.- Altura Activa

Esta clasificación, permite al diseñador de estructuras, **intuir de manera ordenada** la forma y propuesta estructural, debido a que cada tipo de estructura ya responde al análisis del sistema.

⁶ Engel Heino (2001). Sistemas Estructurales. Ed Gustavo Gilli SA, Barcelona

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Así mismo, le permite al estudiante y docente de arquitectura, observar la forma de la estructura a través de los diagramas del análisis estructural sin tener que pasar por la cuantificación.

Por lo tanto, esta clasificación, constituye una herramienta, para lograr un planteamiento estructural sin requerir un proceso de cálculo previo, es decir el análisis estructural, sino un análisis cualitativo basado en diagramas que permiten la comprensión plena de cómo funciona cada sistema estructural.

1.2 Elementos y sistemas estructurales.

A continuación, se identificarán las características entre los sistemas estructurales que los definen como tales y los diferencian de los elementos estructurales:

Los *elementos estructurales* son piezas aisladas que cumplen una función específica de recibir carga y transmitirla, ya sea de compresión, de tracción o ambas. Por ejemplo, una viga, una columna, una losa, etc. En la figura 1.5 se muestran los elementos estructurales que forman un sistema estructural de marco.

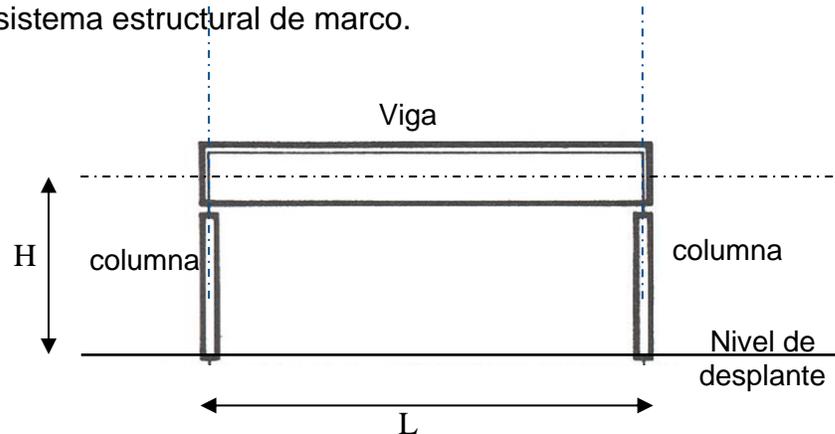


Fig. 1.5 que muestra los elementos estructurales de un marco. (Imagen propia)

Un sistema estructural es un conjunto de elementos estructurales unidos entre sí para dar rigidez al objeto y que éste a su vez sea capaz de resistir las cargas (fuerzas) a las que es sometido durante su uso. Por ejemplo, un edificio, un puente, y cada uno de estos sistemas estructurales se calculan por diferentes métodos.

Además, se considera en el lenguaje de ingeniería y arquitectura que el sistema estructural es "La estructura" del edificio. La estructura de un edificio es la parte resistente, la parte que sostiene a un edificio." *es la base de la seguridad en ese sentido: la seguridad en cuanto a*

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

evitar la posibilidad de daños; que el edificio sea capaz de permanecer mucho tiempo resistiendo su propio peso; soportando las cargas a que es sometido durante su uso, y resistiendo eventos excepcionales como los sismos, los fuertes vientos, los hundimientos del terreno, etcétera. El esqueleto del edificio que resiste esas fuerzas es la estructura, la parte fundamental para la seguridad (Meli 2010b)”

Al avanzar sobre este proceso de análisis, resulta importante identificar que también existen elementos estructurales que funcionan como sistemas estructurales, tal es el caso de las estructuras que resisten por forma, como las membranas que se muestra en la figura 1.6, las cuales son superficies curvas trabajando a esfuerzos de tracción, usuales como “cubierta” y “elemento estructural” simultáneamente.

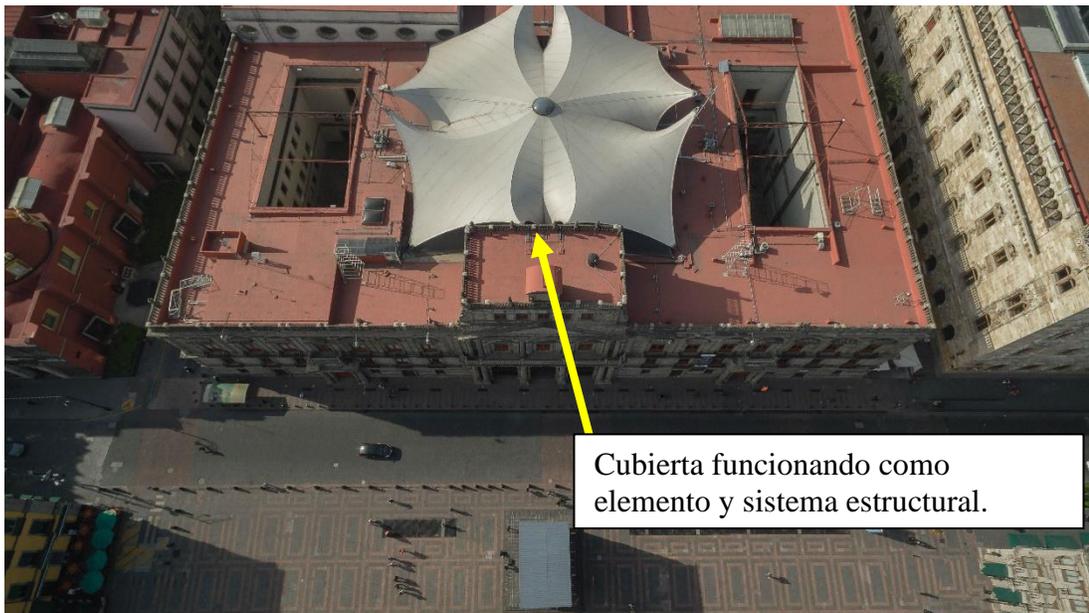


Figura 1.6 que muestra la estructura de membrana de la cubierta del Palacio de Minería, CDMX.

Nota. Adaptado de [Palacio de Minería \(2019\), ¿Sabías que el Palacio de Minería fue el primer inmueble de la UNAM en estrenar una cubierta velaria?](#)
<https://twitter.com/PalacioMineria/status/1174752249660223496/photo/1>

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

1.3 Diferencia entre Sistema Estructural y Sistema constructivo.

Dentro de la enseñanza de las estructuras en el ámbito académico, existe la necesidad de distinguir entre sistema estructural y sistema constructivo.

El sistema constructivo son los materiales que, dispuestos en sus diferentes configuraciones, dan forma al sistema estructural, por lo tanto, es el material con el que se construye el sistema estructural.

El sistema estructural es la disposición y configuración de diversos componentes, por donde se transmiten los esfuerzos a través de ellos.

Si se piensa en una columna, se piensa en un elemento vertical, no en uno horizontal, porque académicamente se sabe que la columna transmite las fuerzas axiales (de arriba hacia abajo), por lo que al pensar en un elemento vertical que transmite esfuerzos verticales se está hablando de su sistema estructural, sin embargo, al pensar en una columna de acero, madera, concreto o bambú, se está hablando de su sistema constructivo, debido a que el material es el sistema constructivo.

Para poder distinguir estos sistemas se recurre al método de analizar casos análogos, con el objetivo de que el alumno y al docente recurran al análisis de casos de sistemas estructurales.

En la figura 1.7 se muestra un ejemplo de esta diferenciación en un sistema de armadura, la armadura puede ser construida en acero o madera, mismo sistema estructural, pero con diferentes sistemas constructivos.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Sistema estructural: Vector activo.
Armadura plana.
Sistema Constructivo: Acero



Sistema estructural: Vector activo.
Armadura plana.
Sistema Constructivo: Madera



Fig. 1.7 Muestra la diferencia entre sistema estructural de armadura y constructivo. Nota.
Foto tomada de <https://pin.it/6PusTJW>, y <https://pin.it/1pMts4R>

La combinación de uno o varios materiales otorgan la posibilidad constructiva necesaria cuyas especificaciones técnicas, mecánicas y de resistencia de cada material, harán posible dar luz a un sistema estructural determinado. ***Es por eso que resulta pertinente incorporar los sistemas estructurales desde el proceso de diseño arquitectónico (composición arquitectónica) inicial y no propiamente desde los sistemas constructivos.*** Los cuales durante en el proceso de diseño no revelan la forma arquitectónica, sin embargo, el sistema estructural nos antecede a una forma arquitectónica. Una vez que se identifica la forma estructural (sistema estructural) la cual revela la intención del diseñador, será posible identificar el sistema constructivo que hará posible dicha forma otorgada.

Un sistema estructural por sí mismo, no tiene identificada aún su materialidad.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Ejemplo del Palacio de Minería.

Continuando con otro ejemplo, la Cubierta del Palacio de Minería⁷. Como se muestra en la figura 1.8, realizada por el equipo que encabeza el Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas, se distinguirá entre sistema estructural y sistema constructivo.

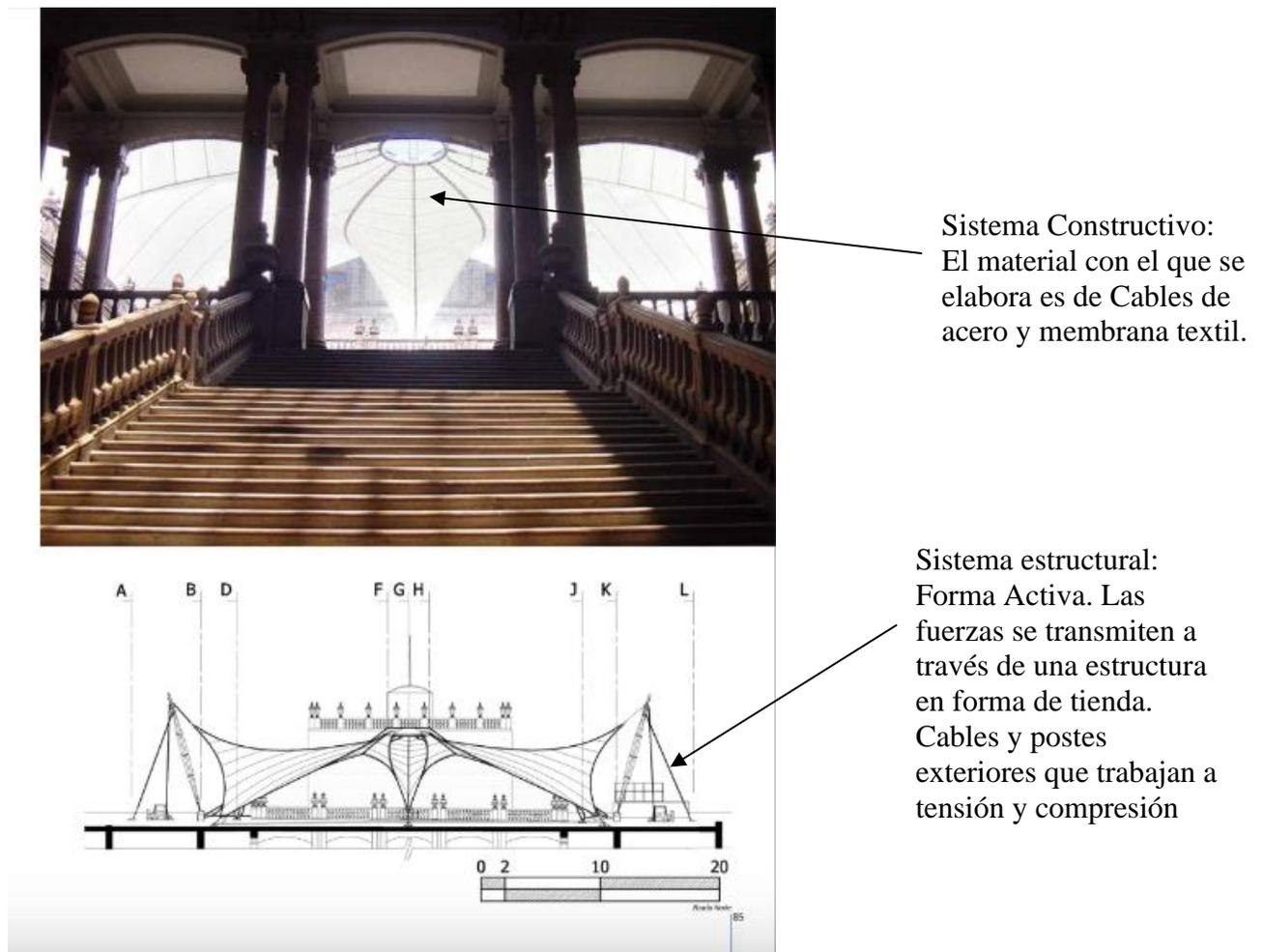


Figura 1.8 que muestra la diferencia entre sistema estructural y sistema constructivo.

Nota. Foto adaptada de <https://doi.org/10.22201/fa.14058901p.2001.5.33773>.

⁷ Oliva, G. (2011). Cubierta tipo en el Palacio de Minería. *Bitácora Arquitectura*, (5), 52–55. <https://doi.org/10.22201/fa.14058901p.2001.5.33773>

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Identificación del sistema estructural de la figura 1.8. Se observa que el sistema estructural consiste en una cubierta de forma activa, de acuerdo con la clasificación de Heino Engel.

Sistema estructural: Se presenta una propuesta radial de estructura velaría desmontable, formada por mantos con superficies de doble curvatura inversa trabajando a tracción, una linternilla y elementos complementarios constituidos por cables y tres postes que equilibran el sistema estructural completo

Identificación del sistema constructivo de la figura 1.8. Se utilizan cables de acero y membrana textil. Mantos fabricados con membrana que tienen recubrimiento de ELUOTOPT (Kynar PVDF, conformado por 59 % flúor, 38 % carbono y 3 % hidrógeno), con retardante al fuego, marca Ferrari. Los elementos metálicos están fabricados en acero al carbón, con capas de anticorrosivos y pintura; existe la posibilidad de optar por acero inoxidable.

Como se observa durante el proceso de diseño, primero es necesario saber cómo se van a transmitir las fuerzas y después se identifica el material que lo hará posible. Todo esto en el contexto de las intenciones arquitectónicas.

Si se hace de una manera inversa, primero el material y luego el sistema estructural, el repertorio de soluciones arquitectónicas posibles se reducen ampliamente.

La mecánica sobre cómo se van a transmitir las fuerzas, remite al tema anterior sobre diseño estructural, en dónde se estudia la manera de conducir las fuerzas hasta el suelo.

Ejemplo del Edificio de Posgrado de Economía

En el siguiente ejemplo se muestra la práctica errónea que predomina en el ámbito estudiantil cuando describe un objeto arquitectónico, suelen mezclarse los conceptos de su sistema constructivo y estructural y posteriormente se muestra la correcta identificación.

Edificio Posgrado de Economía UNAM.⁸

Ubicación: Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México.

En la descripción que los alumnos suelen hacer sobre la obra generalmente se lee:

⁸ Legorreta® (s.f.). Edificio de Posgrado Facultad de Economía UNAM. Recuperado el 05 de mayo del 2024, de <https://www.legorreta.mx/es/proyecto-edificio-de-posgrado-facultad-de-economia-unam>

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

- *La estructura es mixta de concreto con armaduras* para lograr los grandes claros, volados y en algunas zonas las losas serán de losacero para reducir el costo en cimbra. (Legorreta® s.f.)
- Los acabados se propusieron con la piedra volcánica existente del lugar y concreto. Asimismo, se incorporaron obras de los artistas Pilar Climent y Francisco Toledo en las puertas del edificio (Legorreta® s.f.)

Se observa que se mezclan de forma errónea los conceptos de sistemas estructurales, constructivos y arquitectónicos, debido a que mencionan que el sistema estructural es de concreto, siendo que el concreto no es un sistema estructural, sino el constructivo.

La descripción correcta sería la siguiente.

a.1 Descripción del concepto arquitectónico del edificio de posgrado.

- Toda vez que se observó el entorno urbano, surgió el concepto arquitectónico de crear la impresión de que el edificio emergiera de la roca, por lo que se desplantó en muros de piedra braza para integrarse a la piedra existente en el lugar. En estos dos muros de piedra braza se apoyan los dos volúmenes cruzados, formando una forma de cruz en voladizo, esta estructuración permite crear una composición arquitectónica que muestra la iluminación y ventilación natural. (Legorreta® s.f.)

a.2 *El sistema estructural* está solucionado con muros, columnas y armaduras que forman un marco rígido, para poder resolver los grandes claros con voladizos.

a.3 *El sistema constructivo* será mixto, solucionado con concreto y acero, en algunas zonas las losas serán de losacero el cual permite reducir el costo en cimbra.

a.4 *Los acabados* son con la piedra volcánica existente del lugar y fachadas prefabricadas realizadas en concreto.

Se observa en la figura 1.9 tres fotos distintas, la identificación de volúmenes que se refieren al concepto arquitectónico, la estructura que da la forma al volumen y la materialidad de la fachada.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

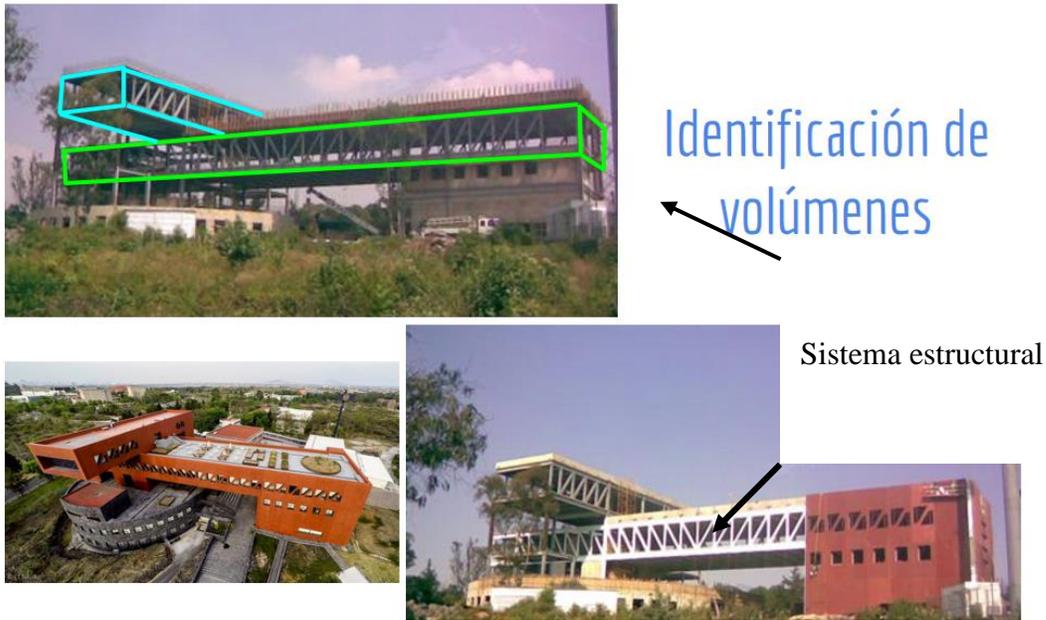


Fig. 1.9 que muestra los volúmenes, la estructura y la materialidad del edificio de posgrado de Economía.

Nota. Adaptada de <https://grupobaysa.com.mx/universidades/>

a.3.- Identificación del Sistema Estructural del edificio de posgrado.

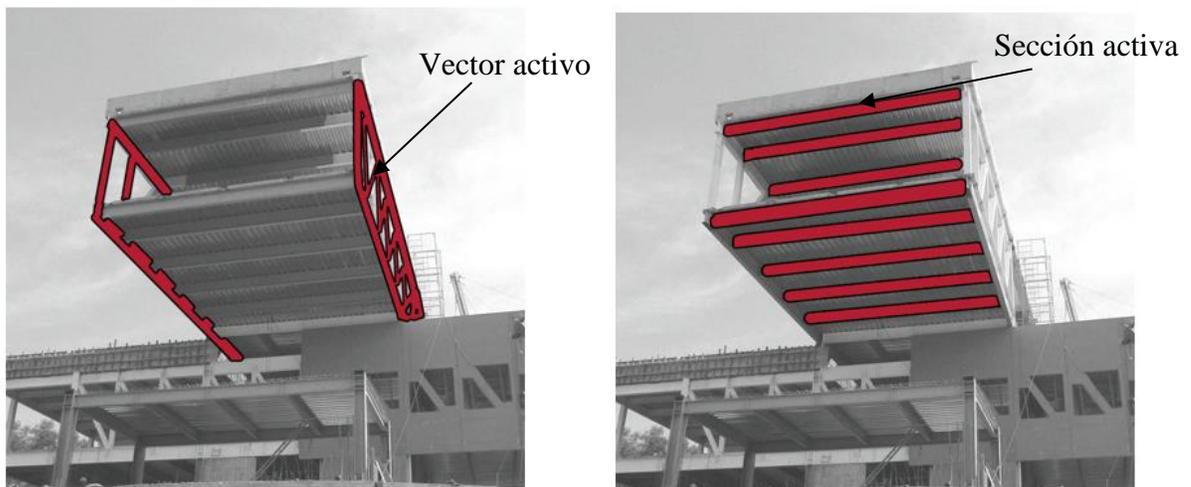


Fig. 1.10 que muestra imágenes sobre la estructuración del voladizo.

Nota. Adaptada de <https://grupobaysa.com.mx/universidades/>

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

En la figura 1.10 Se identifican dos sistemas: Sistema de sección y vector activo según la clasificación de Heino Engel. El alumno y el profesor observan en esta imagen cuál sistema estructural hace posible el volumen mostrado en la figura 1.9

Por lo tanto, se describe cómo funciona el sistema estructural de sección activa y en la figura 1.11 se muestra gráficamente.

- La deformación curva del eje centroidal (flexión) refleja el comportamiento de las estructuras de sección activa.
- Actuación simultánea de esfuerzos de compresión y de tracción en la sección de la viga junto con los esfuerzos cortantes.
- Hay rigidez en dos o tres dimensiones a lo largo de toda la sección.
- Uniones rígidas con los pilares para desviar las fuerzas horizontales hasta el desplante.

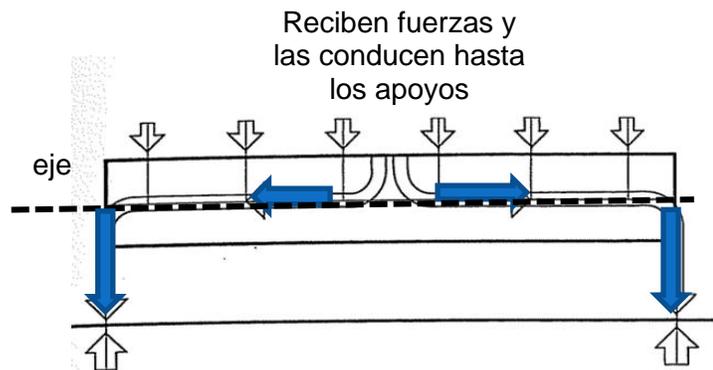


Fig. 1.11 Muestra gráficamente la transmisión de las fuerzas en el sistema de sección activa. (Imagen propia)

Son elementos de construcción rectilíneos y resistentes a la flexión que no solo absorben fuerzas en la dirección de su eje, sino que también pueden desviar fuerzas perpendiculares a su eje mediante esfuerzos internos en su **sección** y transmitir las en la dirección de su eje hasta sus extremos (Engel 2003)

En la figura 1.12 se muestra la relación entre vigas paralelas aisladas y una retícula de vigas: Las vigas lineales biaxiales, formadas por vigas en dos direcciones y unidas entre sí, producen resistencia adicional que permiten reducir la cantidad de material por lo tanto el peralte.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

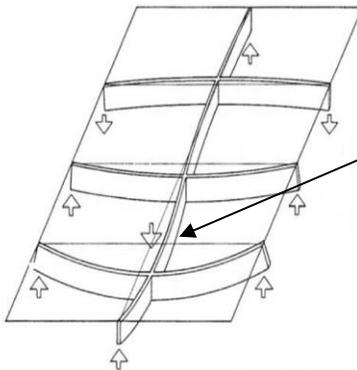
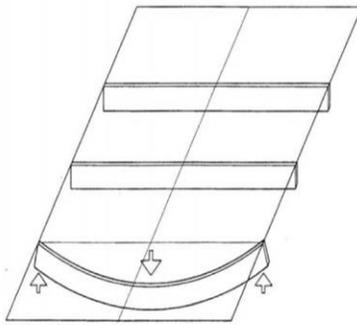


Fig. 1.12 que muestra una retícula de vigas que permite reducir el peralte de la viga. (Imagen propia)

Vector activo. Armaduras.

La característica principal que rige a los sistemas de estructuras de vector activo se muestra en la Ver fig. 1.13 es la triangulación, es decir barras diagonales, donde cada vector representado por una línea contiene, magnitud, sentido de la fuerza y posición de los elementos.

Las barras traccionadas o comprimidas y unidas de forma triangular para formar un sistema con nodos articulados, que pueden dirigir las fuerzas y transmitir las cargas a lo largo de grandes claros sin columnas intermedias.

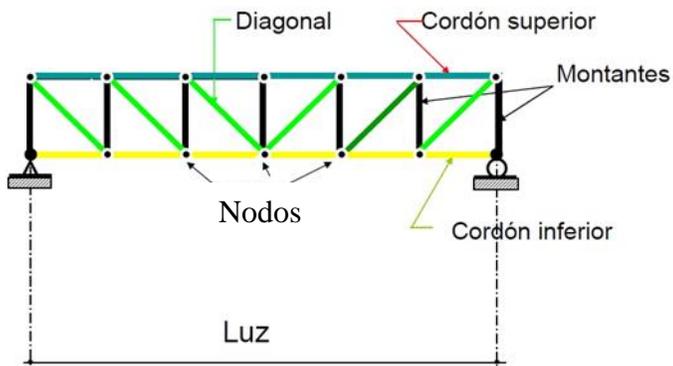


Fig. 1.13 Que muestra una armadura Pratt, donde el momento flector es tomado por esfuerzos en ambos cordones, generando un estado de tensión. (Imagen propia)

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

En la figura 1.14 se muestra la curva funicular que se forma por el esfuerzo de flexión que se genera en los montantes, generando esfuerzos directos de tracción en el cordón inferior y compresión en el cordón superior. Fig. 1.14

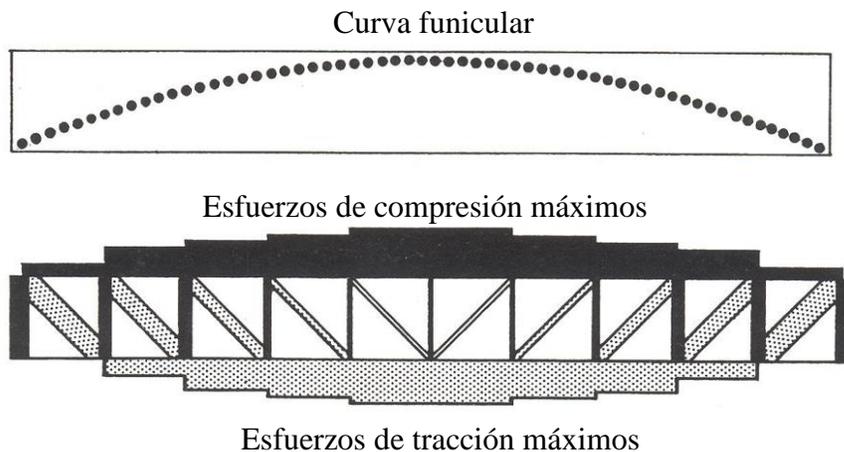


Fig.1.14 Que muestra una armadura de cordones paralelos. (Imagen propia)

Los esfuerzos máximos se producen en la zona central debido a la forma curva que toma el sistema al ser sometido a una carga vertical distribuida uniformemente. Esta zona se conoce como zona crítica.

a.4 Identificación del sistema constructivo.

Armaduras, vigas y columnas de acero con tableros resueltos en losacero, Muros divisores de mampostería. La fachada está resuelta con precolados de concreto y piedra volcánica existente en el lugar.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Conclusiones del capítulo 1.

La identificación correcta de los sistemas tanto estructurales como de los sistemas constructivos, permite al alumno y docente, incorporar un orden correcto de manera oportuna durante el proceso de la composición arquitectónica, debido a que ambos, al ser identificados de manera separada conducen a lograr la forma estructural que da lugar a la forma del objeto arquitectónico.

El sistema estructural otorga la forma arquitectónica y el sistema constructivo es el material que hace posible el desempeño óptimo del sistema estructural.

CAPÍTULO 2

Clasificación de los sistemas estructurales.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Toda vez que se han separado la estructura del material que la hace posible, se debe comprender cómo es que funcionan los sistemas estructurales.

En este apartado, se plantean las clasificaciones estructurales más comunes, para comprender cuál usar y porqué.

2.1 Clasificación en estructuras en pesadas y ligeras⁹.

De acuerdo con Cervera y Blanco (2014) las estructuras pueden adoptar tipologías muy diversas, de acuerdo con su geometría y a su forma de trabajar.

Dentro de esta primera clasificación, es importante señalar que, en cuanto a la conceptualización, suelen distinguirse dos clasificaciones:

a). - Estructuras pesadas. Las estructuras masivas pueden tener una geometría y un comportamiento bidimensional (estados planos de deformaciones o con simetría de revolución) o tridimensional (caso general).

Resisten por masa, generalmente se configuran a base superficies planas y trabajan principalmente a flexión.

b). - Estructuras ligeras. - Resisten por forma, generalmente se configuran a base de superficies curvas y suelen trabajan a esfuerzos directos de tracción y compresión.

Entre las estructuras continuas podemos distinguir aquellas en donde es posible identificar un espesor y hablar de estructuras superficiales, tales como placas que trabajan a flexión, membranas que trabajan a tracción y/o compresión, láminas que trabajan a flexión y a tracción y/o compresión (Cervera y Blanco 2014).

Esta clasificación de Cervera y Blanco no permite identificar cómo se transmiten los esfuerzos porque una estructura ligera puede ser un cable o un arco, pero también puede ser una armadura, y la forma en cómo se transmiten los esfuerzos es diferente en cada una de ellas y además cada una de ellas otorga una forma arquitectónica diferente.

⁹ Cervera Miguel & Blanco Elena, (2014). Mecánica de estructuras. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE). <http://cervera.rmee.upc.edu/libros/Mecánica%20de%20Estructuras.pdf>

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

2.2 Clasificación de estructuras de acuerdo con Charleson.

Una segunda clasificación, corresponde a la identificada por Charleson¹⁰: cuando la estructura define la forma y cuando a menudo ésta estructura funciona como cerramiento del edificio.

Clasificación General.	Material empleado.	Sistema estructural	Comportamiento Estructural
Ligeras y de cubierta.	Concreto armado y Acero	1.-Cascarones	Resisten y transmiten cargas con espesores mínimos. Se basan en su geometría curva en las tres dimensiones y en la correcta posición y orientación de los soportes.
	Textil	2.-Arquitectura textil.	El tejido a tracción resiste desde el principio su peso propio y otras cargas. Se basa en su geometría de doble curvatura inversa. Precisan de elementos estructurales adicionales e independientes con el fin de crear puntos altos de los cuales se pueda tensar el tejido. Ejemplo: Velaria.
	Concreto armado, cables.	3.-Colgantes (Catenarias).	Transfieren las cargas a los soportes mediante esfuerzos de tracción. Ejemplo: un cable que cuelga de dos puntos. Catenarias que soportan cubiertas.
	Concreto armado, armaduras de acero y madera.	4.- Nervadas.	Las nervaduras suelen salir en voladizo desde los cimientos o bien están apuntaladas cerca de la base. Las nervaduras o costillas suelen funcionar como cerramiento. Se apoyan en otras nervaduras para conseguir el equilibrio.

¹⁰ Charleson, A. (2007). *La estructura como arquitectura. Formas, detalles y simbolismo*. Barcelona: Reverté, SA. Pág. 39.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

	Concreto, acero, madera.	5.- Arcos.	Las losas suelen colgarse de los arcos mediante tirantes o bien se apoyan por encima de ellos.
Pesadas	Soporte	6.- Porticadas.	Transmiten las cargas por el sistema tradicional de Marco Rígido: Losas-Vigas - columna. Las fuerzas horizontales se resuelven por medio de muros de arriostamiento. Las fuerzas verticales por medio de muros de carga o columnas.
		7.- Muros.	Los muros trabajan horizontalmente como vigas para recibir las cargas verticales y horizontales.
		8.-Formas concordantes	Diversos sistemas estructurales coexisten en un mismo edificio. Ejemplo: Pórticos que soportan cargas gravitacionales y arriostamientos que resisten acciones horizontales. La estructura que resiste las fuerzas totales es acorde y dan la forma arquitectónica.
		9.-Formas contrastantes	Diversos sistemas estructurales coexisten en un mismo edificio. La estructura contrasta con la forma arquitectónica. La estructura que resiste las fuerzas totales no es acorde a la forma arquitectónica.

Tabla 1 que muestra la clasificación de acuerdo con Charleson

Esta clasificación no es pertinente para este estudio, por lo que no se considera, debido a que la clasificación conforme al sistema constructivo (materialidad) no permite inspeccionar la transmisión de fuerzas. Por ejemplo, en arquitectura textil se enfoca exclusivamente en estructuras de doble curvatura y deja afuera todos los demás sistemas que pudieran resolver con la materialidad textil como puede ser catenarias. Como se atendió en el capítulo 1, la forma otorgada por el material limita la forma arquitectónica.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

2.3 Clasificación de estructuras de acuerdo con Heino Engel.

Heino Engel estudió arquitectura en Alemania y, tras un largo viaje por Oriente Próximo y Asia, de 1952 a 1964 estuvo viviendo entre Japón y Estados Unidos. Convertido en un gran conocedor de la tradición de la arquitectura nipona, ha dirigido también su propio estudio de arquitectura y urbanismo. Es autor de *The Japanese House: A Tradition for Contemporary Architecture* (1964), *Measure and Construction of the Japanese House* (1985) y el clásico *Sistemas de estructuras*, publicado en español y portugués y aparecido originariamente en alemán en 1967 (Editorial GG sf)¹¹. Su libro *Sistemas Estructurales* ha sido el punto de partida en este intento de entender la forma y la estructura, y ha tratado de ser explicado por autores como A Macdonald¹², en su libro “Structures and Architecture”, que toma la clasificación de Engel para explicar su teoría.

Para Engel, todos los objetos están sometidos a fuerzas y actúan a través de su forma. Por eso, la forma siempre cumple una función específica. Además, él plantea que la estructura es lo que asegura que la forma del objeto se mantenga firme y resistente frente a las fuerzas que actúan sobre él.

Esta explicación de Engel deja claro que dependiendo de la forma del objeto es la manera en la que transmite su fuerza y los clasifica en 5 grandes apartados, sin embargo, esta clasificación carece de lógica cuando se lee, por lo que se necesita que Engel sea explicado y entendido. Al entender lo que Engel quiso decir, se revela una simplificación de las fuerzas y la comprensión de la forma arquitectónica.

Por ejemplo, al leer la primera clasificación, Forma activa, lo que se entiende es que Engel puso en este apartado todos los sistemas que a través de las fuerzas de tensión las formas son generadas, al tratar de entender por qué colocó en este apartado las estructuras neumáticas, se comprende que las fuerzas provocadas por el aire incitan a un estado de tensión interno al igual que un cable, o una estructura de tienda que hace que el sistema se mantenga en equilibrio. Este es el principio con el que se diseñó el Centro Acuático Nacional de Pekín, donde se utilizó el sistema ETFE, diseñado por el grupo de ingeniería estructural ARUP. El principio de este sistema es la unión de varios hexágonos y pentágonos de acero recubiertos con cojines laminados de ETFE (etileto, tetra-floruro-etileno) que se embonan como un sándwich al marco y se inyecta aire formando un estado de tensión interior, quedando una forma acolchonada. Al entender este sistema, se entiende por qué Engel lo colocó en este grupo, lo que permite abrir un sinfín de posibilidades de uso

¹¹ Editorial Gustavo Gili (s.f.) Biografía. Consultado el 24 de mayo de 2024. <https://editorialgg.com/heino-engel/>

¹² Macdonald Angus J (2019). *Structure and Architecture*. 3rd Edition, editorial Routledge

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

de este sistema. No solo en fachadas tipo ETFE sino en formas neumáticas que trabajen a tensión con diferentes materiales, incluso materiales sustentables. Lo que nos arroja de nuevo a la teoría de que primero hay que entender el funcionamiento de las fuerzas y luego el material que lo hace posible.

¿Cómo llegó Engel a esta clasificación?

Engel publicó la 1ª edición en 1967 de su sistema de clasificación después de su paso por la Docencia en la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Minnesota entre los años 1956 a 1964, este dato es un indicador de que Engel trata de explicar que la arquitectura a principios del siglo XX en el auge de la tecnología y materiales, debería explicarse además de la forma por su comportamiento estructural, Engel percibe que la arquitectura se separa de la ingeniería y en un intento por cerrar la brecha, explica con imágenes y sin cálculo, el comportamiento de las fuerzas. En esta primera edición del libro sistemas de estructuras, representa con imágenes y maquetas los sistemas de cables sin explicación, estas imágenes se pueden entender desde los principios de la ingeniería, pero no desde la concepción arquitectónica, por lo que no se logra cerrar la brecha. Sin embargo, al explicar y entender cada una de las propuestas de Engel permite cerrar esta brecha entre la forma arquitectónica y la forma estructural.

La 2a edición en 2018 del libro sistemas estructurales, continua sin explicar con palabras en un intento de permitir que las imágenes hablen.

La mayoría de los autores que citan a Engel lo hacen desde la comprensión de uno o dos sistemas estructurales y desde el conocimiento de la ingeniería. Inclusive el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF) en su edición 2023 de la Ciudad de México, en las Normas Técnicas Complementarias de Diseño por Sismo, muestra la clasificación de Engel en su sistema de transmisión de fuerzas de la clasificación de Altura Activa.

Más allá del giro que tomó el libro hacia una interpretación desde la ingeniería estructural, Engel deja ver en la introducción de su libro, que su interés genuino es el de la relación espacio-forma.

En la figura 2.1 se muestra el procedimiento del estudio de Engel, en donde propone una clasificación de estructuras que hacen posible la materialización de la configuración espacio-forma y establece una secuencia ordenada para lograrlo

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

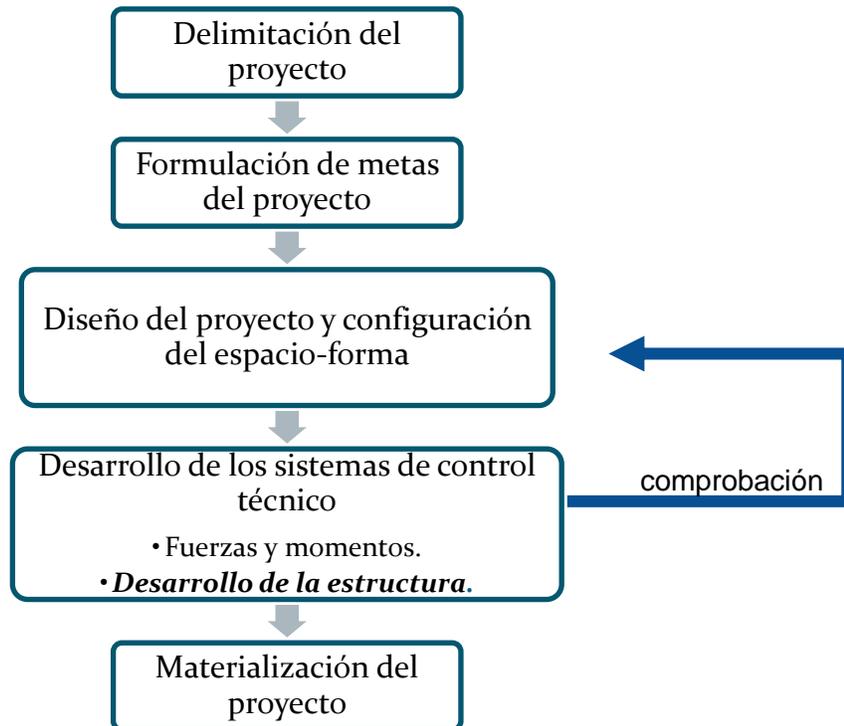


Fig. 2.1 Diagrama de flujo que muestra la secuencia para llegar a materializar un proyecto de acuerdo con Heino Engel. (Imagen propia)

Esta clasificación, está determinada por la transmisión de fuerzas y por la forma que provoca el equilibrio de estos sistemas.

En este gráfico, lo que Engel intenta mostrar es que debería de existir un ciclo entre la relación espacio- forma y el desarrollo de los sistemas estructurales que lo hacen posible.

Si el sistema estructural elegido, no satisface la configuración espacio-forma, ese sistema no es el adecuado y entonces se elegirá uno diferente.

Este ciclo de comprobación [sistema estructural - configuración espacio forma], es posible en la medida que se conozcan los diferentes sistemas estructurales, su comportamiento y la forma que otorgan.

Esa es la razón original que Engel propuso al agrupar en modos de transmisión de fuerzas su clasificación.

Comprender la diferencia entre un sistema de sección activa y uno de vector activo, permite al arquitecto solucionar el espacio con una determinada intención arquitectónica, que era la idea original de Engel.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Más allá de que al ingeniero esta clasificación le ayude a estructurar formas complejas, es un potencial durante la formación del joven arquitecto, que podrá idear formas arquitectónicas desde un concepto real.

Derivado de esta clasificación, se propone en esta tesis, una taxonomía de los sistemas estructurales basados en la clasificación de Engel.

Para ello se identifican 5 sistemas, observando que efectivamente *la clasificación de la transmisión de fuerzas otorga una forma estructural similar pero no idéntica.*

2.3.0 En la tabla 2.1 se propone una Taxonomía de los sistemas estructurales.

1 FA Forma Activa	FA 1	Estructuras de Cables
	FA 2	Estructuras de Tiendas
	FA 3	Estructuras Neumáticas
	FA 4	Estructuras de Arcos
2 VA Vector Activo	VA 1	Armaduras Planas
	VA 2	Armaduras Planas Combinadas
	VA 3	Armaduras Curvas
	VA 4	Mallas Espaciales
3 SA Sección Activa	SA 1	Estructuras de Vigas
	SA 2	Estructuras de Pórticos
	SA 3	Estructuras de Retículas de Vigas
	SA 4	Estructuras de Losas
4	SUA 1	Estructuras de Láminas

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

SUA Superficie Activa	SUA 2	Estructuras de Láminas plegadas
	SUA 3	Estructuras de Membranas
5 AA Altura Activa	AA 1	Rascacielos Reticulares
	AA 2	Rascacielos Perimetrales
	AA 3	Rascacielos con Núcleo
	AA 4	Rascacielos Puente

Tabla 2.1 que muestra la propuesta de la taxonomía de la clasificación de los sistemas estructurales.

El siguiente apartado, describe el funcionamiento estructural de cada una de las clasificaciones de los sistemas estructurales de acuerdo con la taxonomía propuesta.

2.3.1 Transmisión de las fuerzas en las estructuras de Forma Activa (FA)

Son sistemas de material flexible, en donde la transmisión de cargas se realiza a través del diseño de la forma adecuada y una estabilización característica de la forma Ejemplos: Catenarias, velarías, neumáticas, arcos.

FA1) Estructuras de Cables.

El cable es un elemento flexible que, sujeto a cargas externas, adquiere una forma concreta llamada funicular, que depende de la magnitud y posición de estas. Desarrolla sólo esfuerzos de tracción, por lo que, junto con la alta resistencia del material, hace que constituya una estructura bastante ligera. Las primeras estructuras formadas por cables fueron puentes colgantes y, posteriormente, puentes atirantados. Hasta finales del siglo XIX no se utilizaron para cubiertas de edificios de grandes claros (Cervera y Blanco 2014).

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

El **funicular** de cargas es la curva que describe un cable suspendido por sus extremos, sometido a cargas en su longitud. Si las cargas son el propio peso del cable se obtiene una curva denominada **catenaria**. Si las cargas son uniformes en proyección vertical, se obtiene la **parábola**. Si son perpendiculares a cada punto del cable, el **arco**, etc. (Cervera y Blanco 2014)

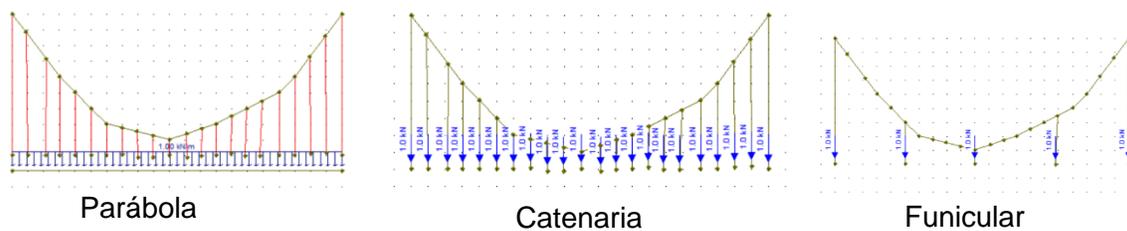


Fig. 2.2 que muestra los arcos funiculares. (Imagen propia)

Los arcos funiculares se generan invirtiendo cada una de las funiculares generadas por sus cargas logrando invertir la curva, Fig. 2.2

El caso de la Alberca Olímpica en la Ciudad de México fig. 2.3, permite la expresión de la intención del objeto arquitectónico y del funcionamiento del cable. Para que el sistema se mantenga en equilibrio se requiere de esfuerzos contrarios y de la misma magnitud, lo que genera una forma arquitectónica simétrica y equilibrada.



Fig. 2.3 Fotografías de la maqueta de la alberca Olímpica elaborada por alumnos de la UAM Xochimilco. Fotografía por González, Norma.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

A principios del siglo XX este sistema funicular fue ampliamente estudiado por Gaudí y Frei Otto.

Antes de que los cables hicieran su aparición, en el Medievo, surgieron los contrafuertes para equilibrar el esfuerzo que generaba la altura de las catedrales, con lo que surgió una nueva forma estructural.

FA 2) Estructuras de forma de tienda.

Sistemas de velarias con soportes exteriores mediante barras a compresión. Las estructuras en forma de velaría o tienda son una evolución del sistema de cables. Se caracteriza por su sistema constructivo de cubierta textil.

Cuando se colocan círculos de cables en líneas horizontales, La capacidad de resistir cargas aumenta sobre todo en cargas de diferente magnitud o asimétricas. Existe una concentración de fuerzas en la parte más alta, por lo que la superficie en el punto más alto se amplifica, debido a esta función de la fuerza surge la forma en punta redondeada.

Este sistema tiene su potencial en que las fuerzas asimétricas equilibradas generan formas asimétricas.

El Arquitecto e ingeniero estructural alemán, Frei Otto¹³ (31 mayo 1925 a 9 marzo 2015) fue conocido por sus innovaciones en estructuras ligeras de tracción, provocando las llamadas tenso estructuras.

Frei Otto en su búsqueda de nuevos métodos para utilizar la menor cantidad de material posible, experimentó con diferentes formas, pompas de jabón, telarañas, traduciendo las fuerzas del sistema en formas delicadas y elegantes. Llama la atención que para poder generar nuevas formas arquitectónicas es necesario estudiar nuevos sistemas de transmisión de fuerzas.

FA 3) Estructuras Neumáticas.

La forma de la membrana resultante del estado de cargas provocado por el aire como elemento de carga, es la geometría básica de las estructuras neumáticas: Superficies esféricas.

¹³ Glaeser, Ludwig (2017). The Work of Frei Otto. The Museum of Art Modern MoMA. https://assets.moma.org/documents/moma_catalogue_2662_300299029.pdf

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Este es el sistema que sustenta las estructuras ETFE con el Estadio Allianz en Munich¹⁴ y el Centro acuático Nacional¹⁵ en Beijing, China. En Monterrey, México el Centro Comercial Paseo La Fe¹⁶, utilizó este sistema para reducir la cantidad de acero al aumentar las fuerzas de tensión con el aire inyectado, al mismo tiempo que permite la transparencia, funciona como aislante térmico y reduce costos de mantenimiento.

Las superficies esféricas tienen la capacidad de maximizar el volumen del sistema con la mínima superficie, de tal manera que si se llega a cambiar la forma. El volumen no se ve afectado, por eso se dice que tiene una óptima función ante las deformaciones.

Las estructuras de membrana uniforme tienen la capacidad de transmitir las presiones al interior en igual magnitud en todas las direcciones y puntos.

Este sistema funciona igual que el arco funicular, la variación es que las fuerzas producidas se deben al aire y no a una fuerza puntual.

Se observa que mientras aumenta la curvatura, disminuyen las tensiones y mientras disminuya la flecha, aumenta la presión, como el arco funicular.

FA 4) Estructuras de arcos.

El arco y el cable son complementarios. El mecanismo del cable portante solo puede absorber tracciones. Toma la forma de catenaria.

El cable de carga invertido, es decir, el ARCO funicular, trabaja solo a compresión, toma la forma de catenaria invertida, por ello es que en ocasiones le llaman antifuniculares.

La combinación de cable portante y arco funicular no provoca ninguna reacción horizontal, ya que las componentes horizontales de ambos son opuestas y se equilibran entre sí.

Durante la Alta Edad Media se mantiene en Europa occidental el arco de medio punto y bóveda de cañón como herencia romana. El arco de medio punto es un arco verdadero que no coincide con el antifunicular por lo que ofrece poca resistencia. La estabilidad de los

¹⁴ Herzog & De Meuron (2019). Herzog y De Meuron. Ed. Arquitectura Viva SL.

<https://www.herzogdeuron.com/monographs/herzog-de-meuron-1978-2002-arquitectura-viva/>

¹⁵ idem

¹⁶ Muñoz R. (2021) ©Biolightweight Architecture. <https://biolwa.com/paseo-la-fe/>

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

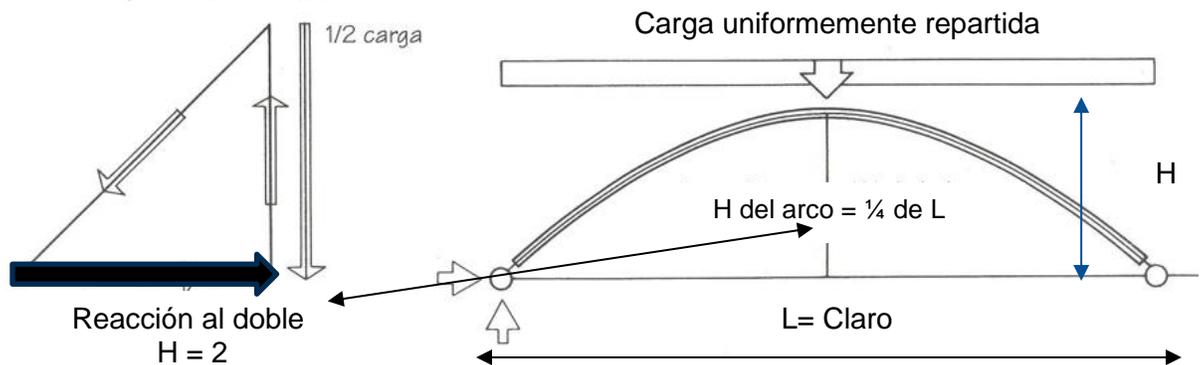
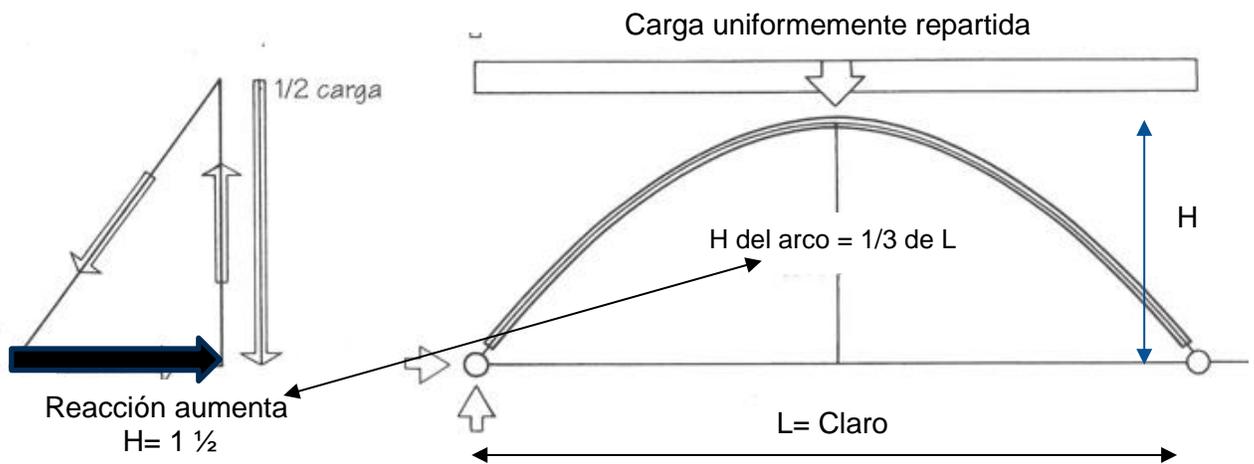
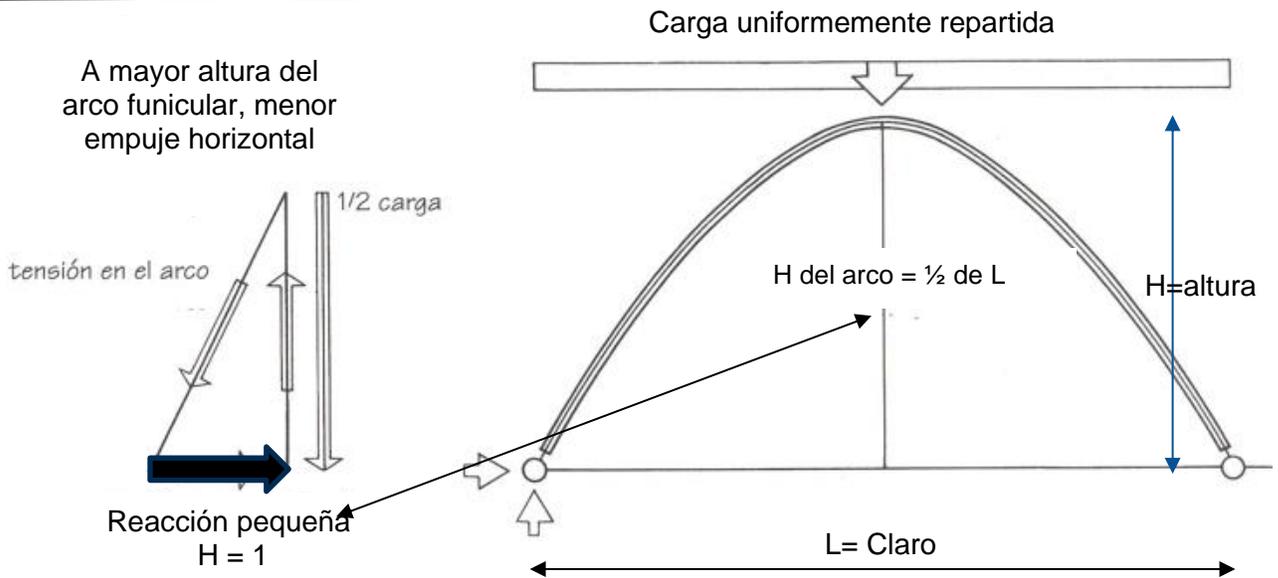
arcos y puentes romanos se basa en la masa resistente que constituye el material de relleno (Ramos y León 2011)¹⁷

En la antigüedad, no se conocía el concepto de antifunicular, sin embargo, de forma experimental se aproximaban a la solución cambiando las cargas colocando rellenos sobre los apoyos y/o variaban el espesor del arco de medio punto.

La reacción horizontal de un arco es inversamente proporcional a su altura, de tal manera que mientras más alto sea el arco, la reacción horizontal en los apoyos disminuye, véase la fig. 2.4

¹⁷ Sánchez, Alberto (2009.). Estudio de una metodología para transformar cualquier geometría en antifunicular añadiendo cargas externas. Universidad Politécnica de Madrid, https://oa.upm.es/38313/1/Tesis_master_Alberto_Sanchez_Corrales.pdf

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS



A menor altura del arco funicular, se incrementa el empuje horizontal

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

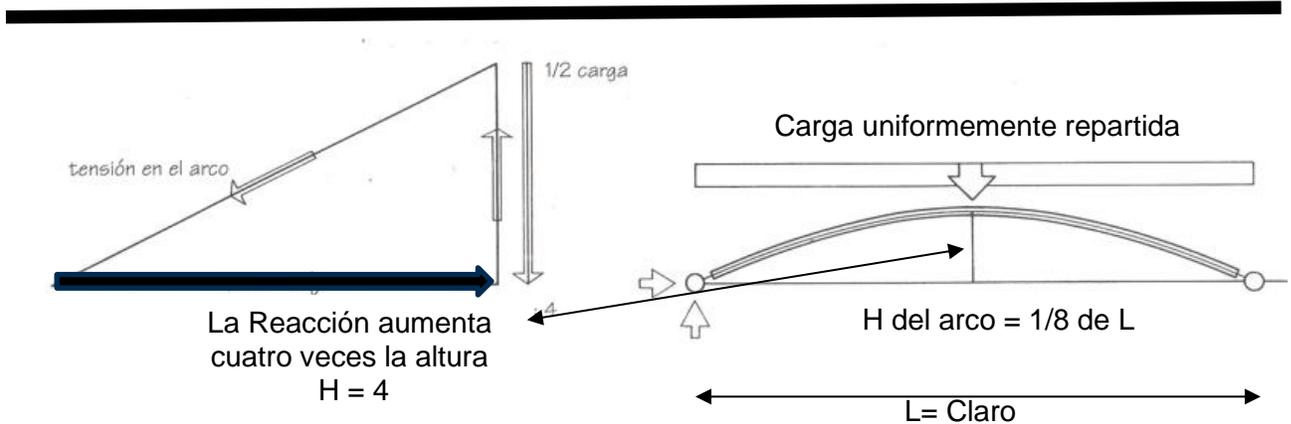


Fig. 2.4 Esquema donde se muestra que la reacción horizontal de un arco aumenta cuando su altura disminuye. (Imagen propia)

A simple vista parece que una cualidad fundamental del arco es su forma curva. Sin embargo, esta forma curva resulta insuficiente, pues si se apoya isostáticamente (sin restricción en la reacción horizontal), solo se dispondrá de una viga curva, no de un arco, porque empiezan a aparecer momentos flexionantes y se comportará como una viga curva y no como un arco. Hay que considerar las condiciones de apoyo para lograr ver lo esencial de la estructura arco, la existencia de esfuerzos longitudinales, es decir los empujes horizontales, que son los que determinan su forma.¹⁸

La comprensión de este sistema ha permitido que nuevas formas arquitectónicas surjan con arcos de menor altura y sin contrafuertes, utilizando los marcos rígidos de concreto como un contraventeo. Un ejemplo de ello es el Centro Social Utopía Ixtapalcalli, ubicado en la alcaldía Iztapalapa, Ciudad de México. La cubierta está formada por arcos que exhiben una altura de $1/6$ y para sostener las fuerzas horizontales se utilizan marcos de concreto, utilizando traveses de gran altura.

El siguiente ejemplo, fig. 2.5 muestra la interpretación del arco de alumnos de licenciatura. Se utilizó el sistema de arcos para lograr una composición con ritmos entre los arcos y que permitió colocar una cubierta de madera sobre ellos.

¹⁸ ítem

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS



Fig. 2.5 Maqueta realizada por alumnos de la Universidad Anáhuac México, en donde se muestra el sistema de arcos en la solución de un foro abierto. Fotografía por Norma González.

2.3.2.- Transmisión de las fuerzas en estructuras de Vector Activo (VA)

Estructuras de *vector activo* (VA). – Son sistemas de barras cortas, sólidas y rectas (elementos lineales), donde la transmisión de fuerzas se realiza mediante la descomposición en barras, es decir, a través de una subdivisión en fuerzas en una sola dirección, compresiones o tracciones. Ejemplo: armaduras planas, armaduras tridimensionales, mallas espaciales.

VA1. Estructuras de armadura plana.

Las armaduras tienen una característica formal de cada arreglo o composición es la triangulación y unión mediante nodos. Para analizar o diseñar una armadura, es necesario determinar la fuerza en cada una de sus barras para ello se considera que los elementos de la armadura plana se encuentran en el mismo plano y que cada nodo está sometido a un sistema de fuerzas que es coplanar y concurrente. Fig. 2.5

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

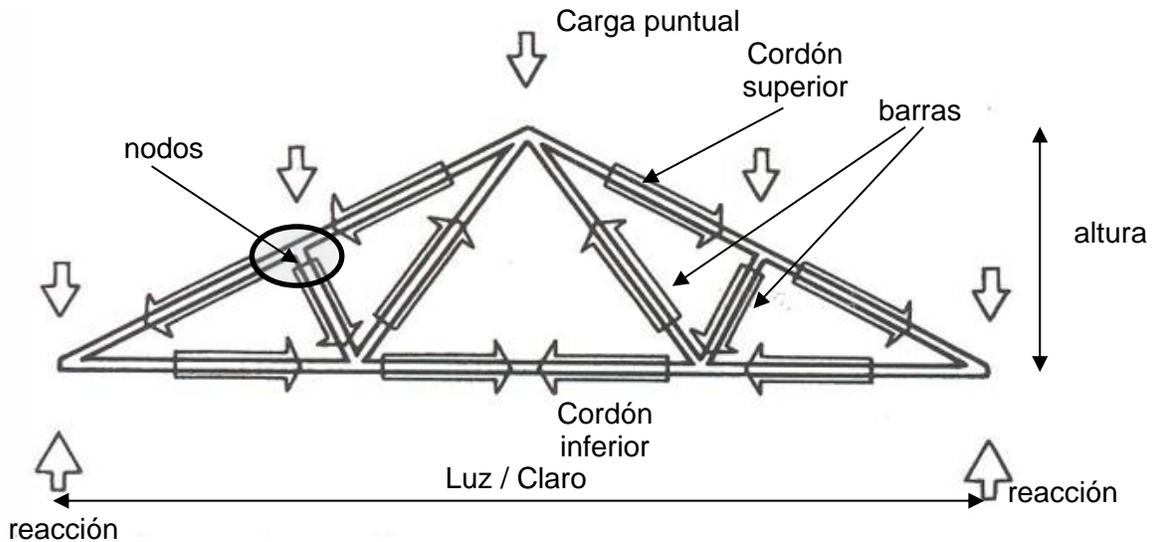
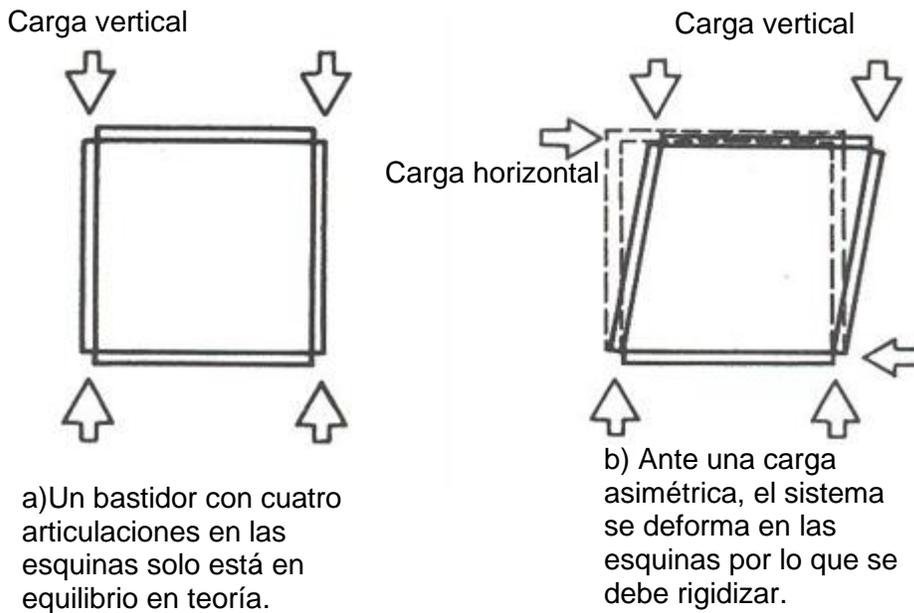
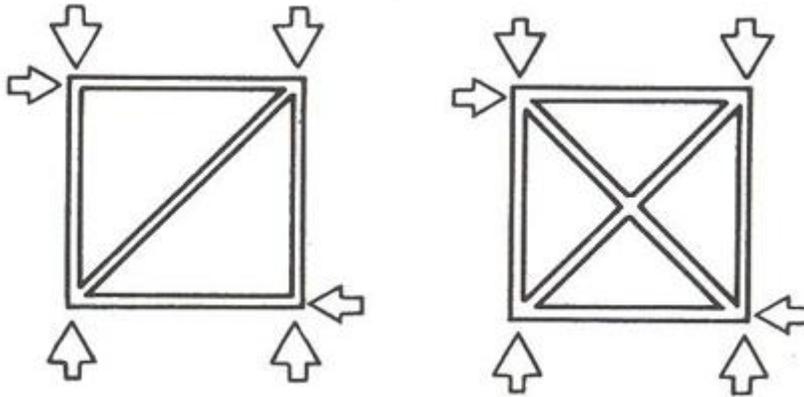


Fig. 2.6 Transmisión de fuerzas exteriores mediante el esquema adecuado de barras individuales. (Imagen propia)

Importancia del arriostramiento de armadura mediante triangulación de cada bastidor para evitar su deformación, fig. 2.7.



ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

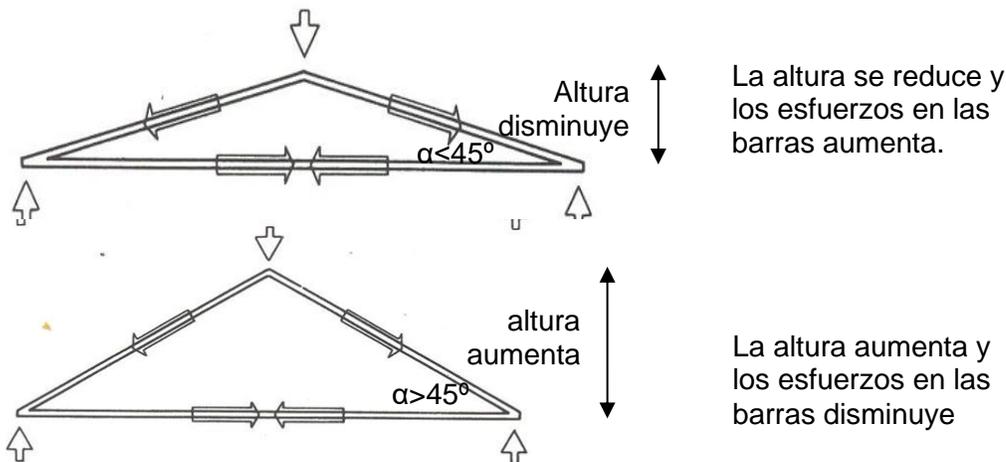


c. Las barras diagonales impiden la deformación. El bastidor se convierte en cercha.

d. Una segunda barra diagonal aumenta el arrojamiento, pero resulta innecesario para efectos vectoriales.

Fig. 2.7 que muestra la estabilidad del marco al arriostrarlo, convirtiéndolo en el sistema de armadura. (Imagen propia)

El sistema de vectores funciona porque la fuerza exterior se equilibra mediante dos o más fuerzas vectoriales, sin embargo, se debe de mantener una altura favorable para que esto suceda. Se debe mantener un ángulo (α) entre 45° y 60° α Fig. 2.8



La altura se reduce y los esfuerzos en las barras aumenta.

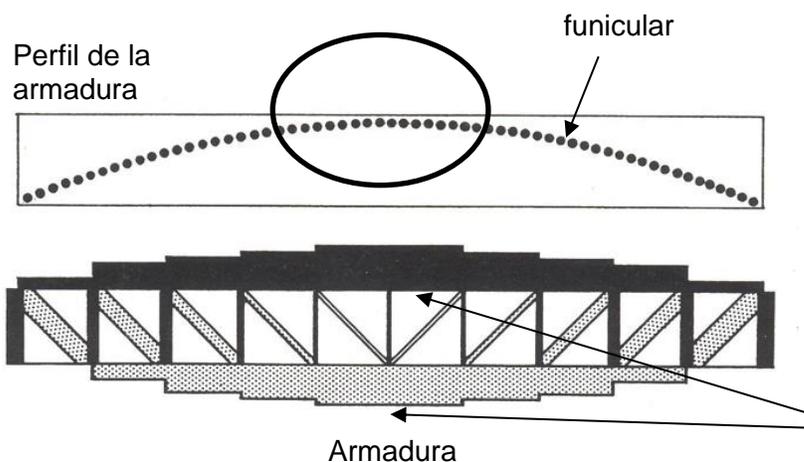
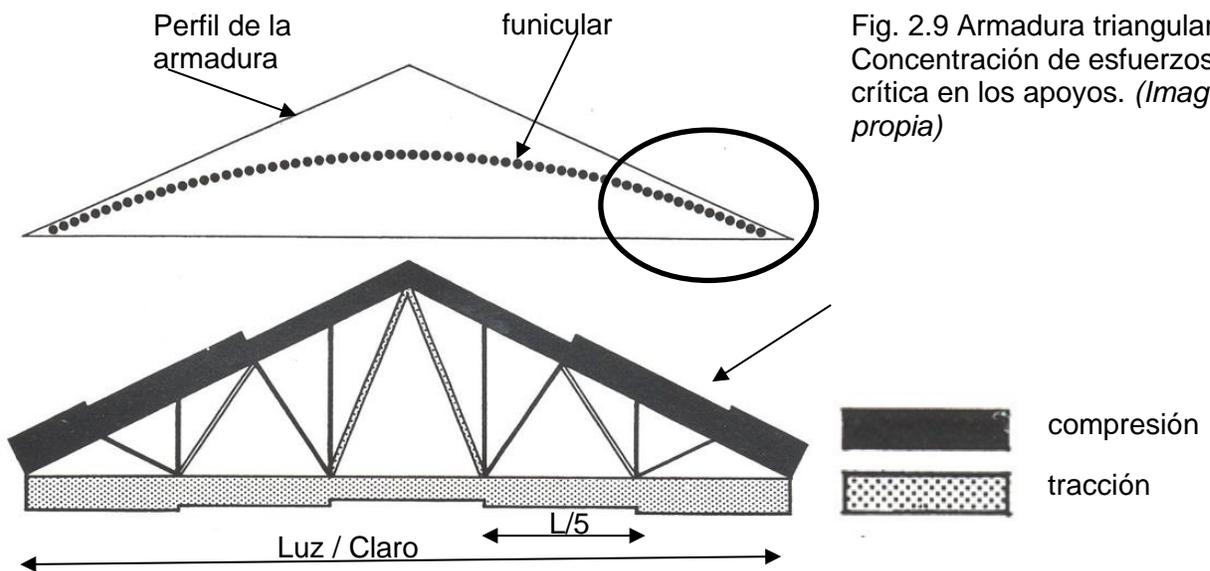
La altura aumenta y los esfuerzos en las barras disminuye

Fig. 2.8 que muestra cómo funciona el sistema de barras en armadura. (Imagen propia)

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Influencia de la geometría compositiva de la armadura sobre el desempeño de los cordones y las barras.

La línea funicular de una armadura plana muestra cómo se transmiten naturalmente las fuerzas hacia los apoyos. Mediante la comparación de diferentes geometrías de la armadura se deducen conclusiones comparables sobre los esfuerzos dentro de la armadura. La regla general es que cuando coinciden la línea funicular y el perfil de la armadura menos efectiva es la transmisión de los esfuerzos ver Fig. 2.10 y 2.11 por lo que la armadura de dos aguas resulta más económica, fig. 2.9.



ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Un ejemplo de armadura plana de cordones paralelos para lograr un gran claro, es el Posgrado de Economía ubicado en Ciudad Universitaria, Ciudad de México. La armadura doblemente apoyada y con un voladizo de más de 15 m logra una volumetría del objeto arquitectónico masiva, se logra combinando una base de sistemas de pórticos y vector activo.

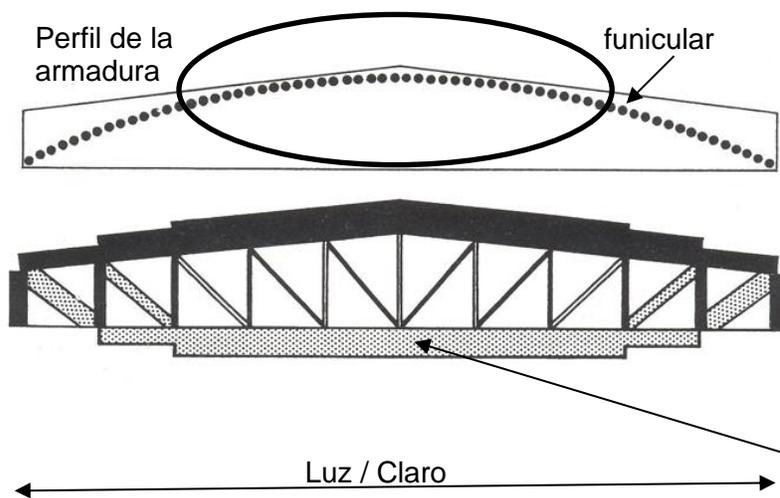


Fig. 2.11 Armadura trapezoidal. El perfil de la armadura coincide con la curva funicular. El cordón superior e inferior reciben la carga a lo largo de una zona central más amplia; los esfuerzos se reparten de forma equitativa. *(Imagen propia)*

Reparto de intensidad de esfuerzos más equilibrados en el centro de la armadura. *(Imagen propia)*

Este sistema que es utilizado tanto para solucionar puentes vehiculares y peatonales, trasladado a la arquitectura ha dado soluciones para lograr voladizos de más de 15 metros, con este sistema se logró solucionar las losas del edificio Seguros Monterrey en la Ciudad de México, Fig. 2.12.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS



Fig. 2.12 Maqueta elaborada por alumnos de la UNAM en donde se muestra el sistema estructural del edificio Seguros Monterrey y la solución de los entrepisos que cuelgan de una serie de armaduras dispuestas en la parte superior del edificio. Fotografía por Norma González.

2.3.3.- Transmisión de fuerzas en las estructuras de Sección Activa (SA)

Son sistemas de elementos lineales rígidos y macizos incluida su compactación como losa, donde la transmisión de cargas se efectúa mediante de la transmisión de fuerzas a través de la sección. Ejemplo: Vigas, pórticos, retículas de vigas, losas.

Un ejemplo típico de los sistemas estructurales de sección activa es la viga lineal (o una losa) sobre dos apoyos. **A través de su sección, desvían las fuerzas** (que absorbe) a noventa grados y las transmite a sus apoyos, Fig. 2.13. Si se modifica la sección, se modifica el mecanismo de transmisión de las fuerzas.

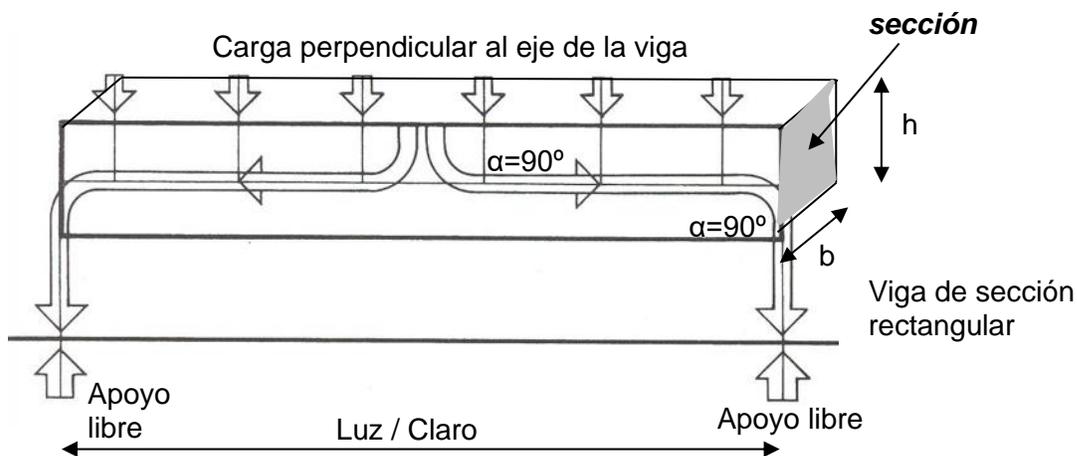


Fig. 2.13 que muestra la transmisión de fuerzas hacia los apoyos a

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

El eje neutro se flexiona provocando una curva hacia abajo, es decir, la deformación por flexión (Momento flector), fig. 2.14, y es la característica del comportamiento de las estructuras de sección activa.

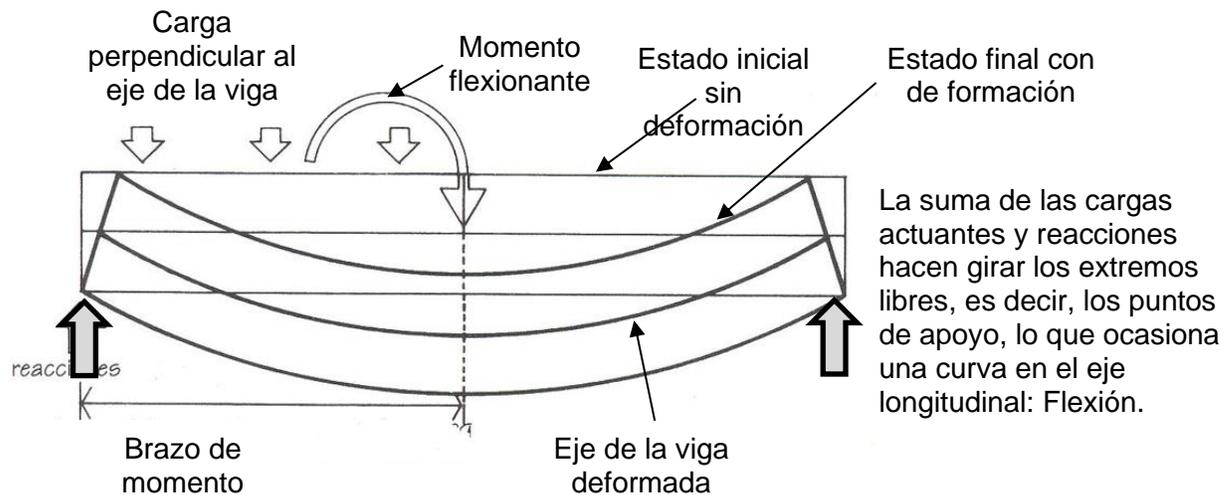


Fig. 2.14 que muestra la deformación por flexión través de la sección.
(Imagen propia)

Teoría de la flexión que estableció el ingeniero Francés Navier, fig. 2.15. Al provocarse la flexión en vigas, le suceden esfuerzos de compresión en el lecho superior y esfuerzos de tracción en lecho inferior. Los esfuerzos van disminuyendo mientras se van alejando del lecho superior e inferior, hasta un punto en el que no existen esfuerzos de tracción, ni esfuerzos de compresión, a este punto se le llama eje neutro.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

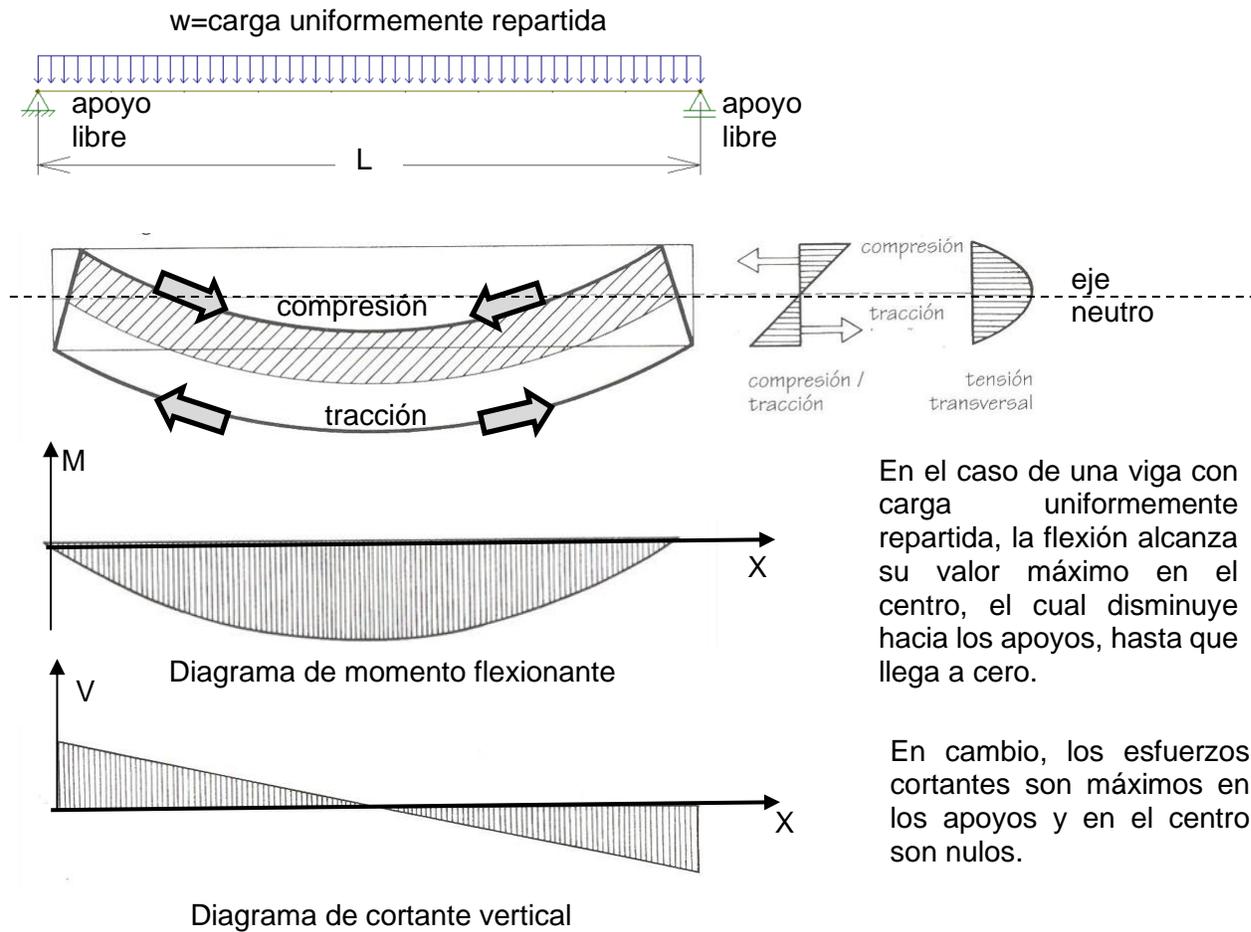
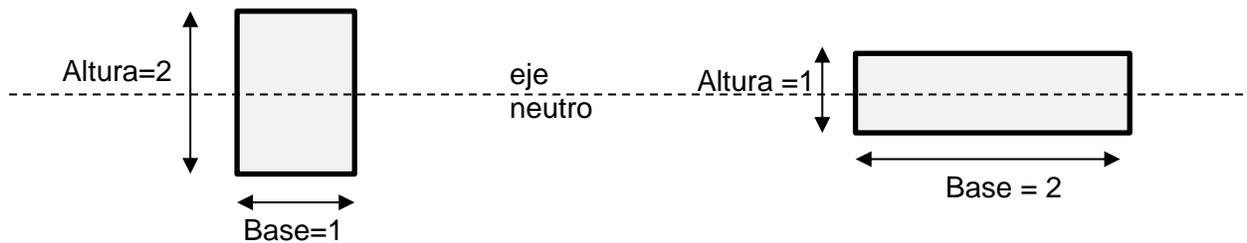


Fig. 2.15 Esquema de esfuerzos y diagramas cuando una viga recibe una carga uniformemente distribuida. (Imagen propia)

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

SA 1.- Estructura de vigas.

El momento de inercia de una viga está condicionada por su sección, la relación base - altura ver fig. 2.16, lo que es importante para poder incrementar a nuestra voluntad la resistencia de las estructuras de sección activa. Ilustra, que entre más alejada esté la masa del eje neutro, mayor será la resistencia a la flexión.



En una relación de base=1 y altura=2, o de 1 a 3, el momento de inercia es mayor, por lo tanto, la resistencia a la flexión es mayor.

En una relación de base=2 y altura=1, o de 3 a 1, el momento de inercia es menor, por lo tanto, la resistencia a la flexión disminuye.

Fig. 2.16 figura que muestra la importancia de la relación del momento de inercia con la resistencia a flexión. (Imagen propia)

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Mediante conexiones empotradas o rígidas formando un marco rígido, en el que cada componente participa en el mecanismo de resistencia frente a la deformación. Al rigidizar las uniones se reduce la flecha vertical, por lo tanto, se reduce la sección, Fig. 2.17

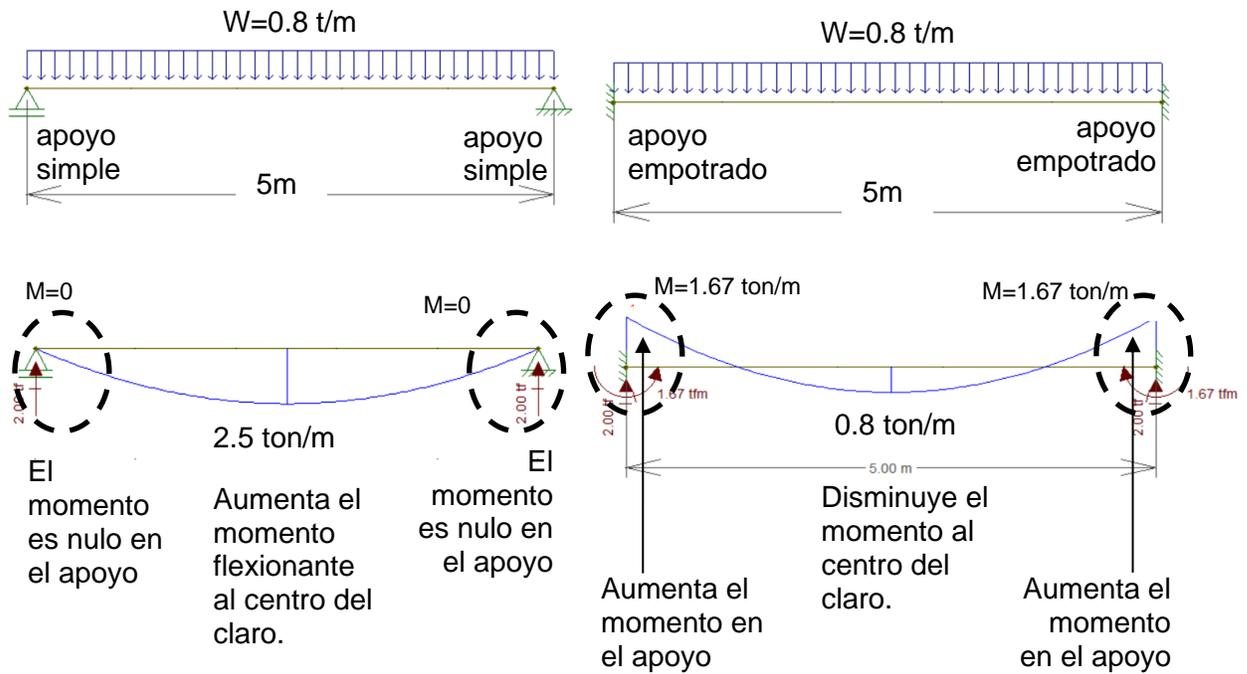


Fig. 2.17 Esquema del impacto que provoca el tipo de apoyo en el diagrama de momento flexionante. (Imagen propia)

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

SA 2.-Estructuras de Pórtico, fig. 2.18

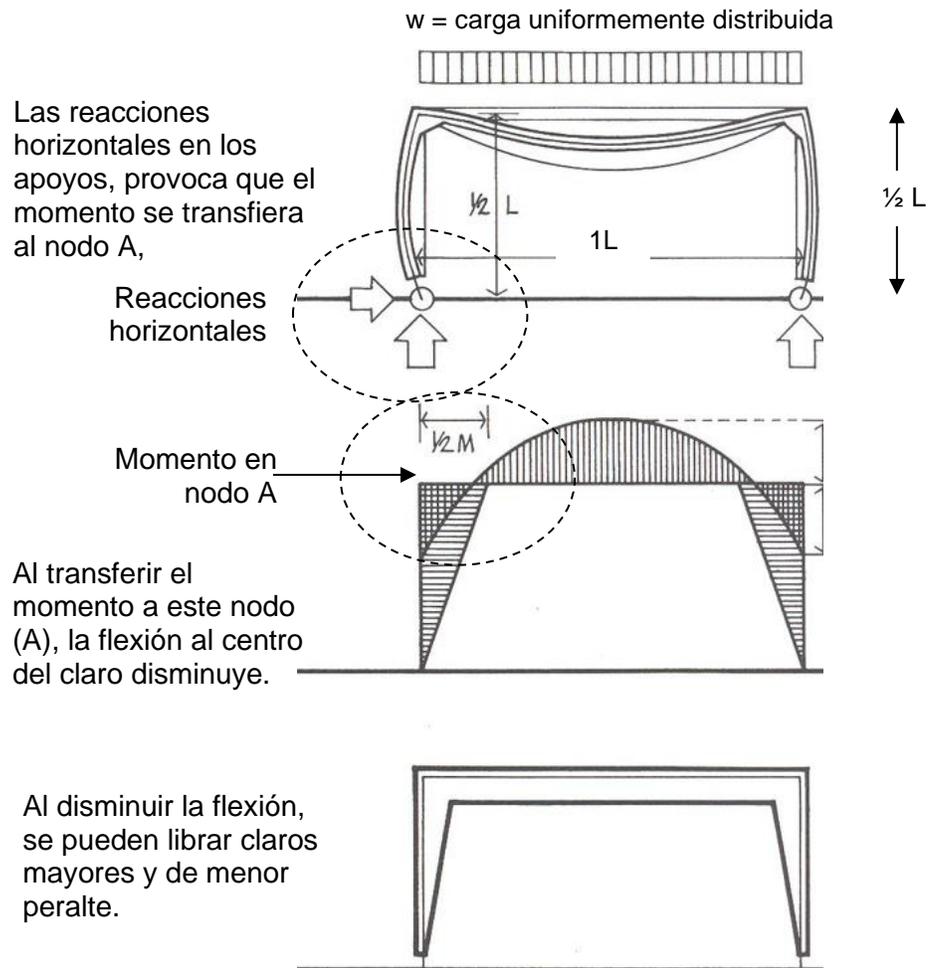


Fig. 2.18 Esquema sobre la reducción de la flexión en un pórtico cuando se empotra el apoyo y se generan reacciones horizontales en los apoyos. (Imagen propia)

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

En la fig. 2.19 se muestra el sistema de pórticos del edificio del taller Carlos Lazo de la Facultad de Arquitectura de la UNAM, maqueta realizada por alumnos de 3er semestre de este mismo taller.



Fig. 2.19 en donde se muestra el sistema de pórticos del Taller Carlos Lazo de la Facultad de Arquitectura de la UNAM. Fotografía por Norma González

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Mecanismo de pórtico de varios vanos. Viga Virendeel.

La viga Virendeel fig. 2.20 es una combinación pórtico y viga, debido a la deformación de las vigas analizada anteriormente, se sabe que los extremos de los montantes giran en sentido contrario hacia arriba y hacia abajo. Con ello, el montante absorbe el giro y se reduce la deformación por flexión. La eficacia aumenta cuanto mayor sea el número de vanos (montantes).

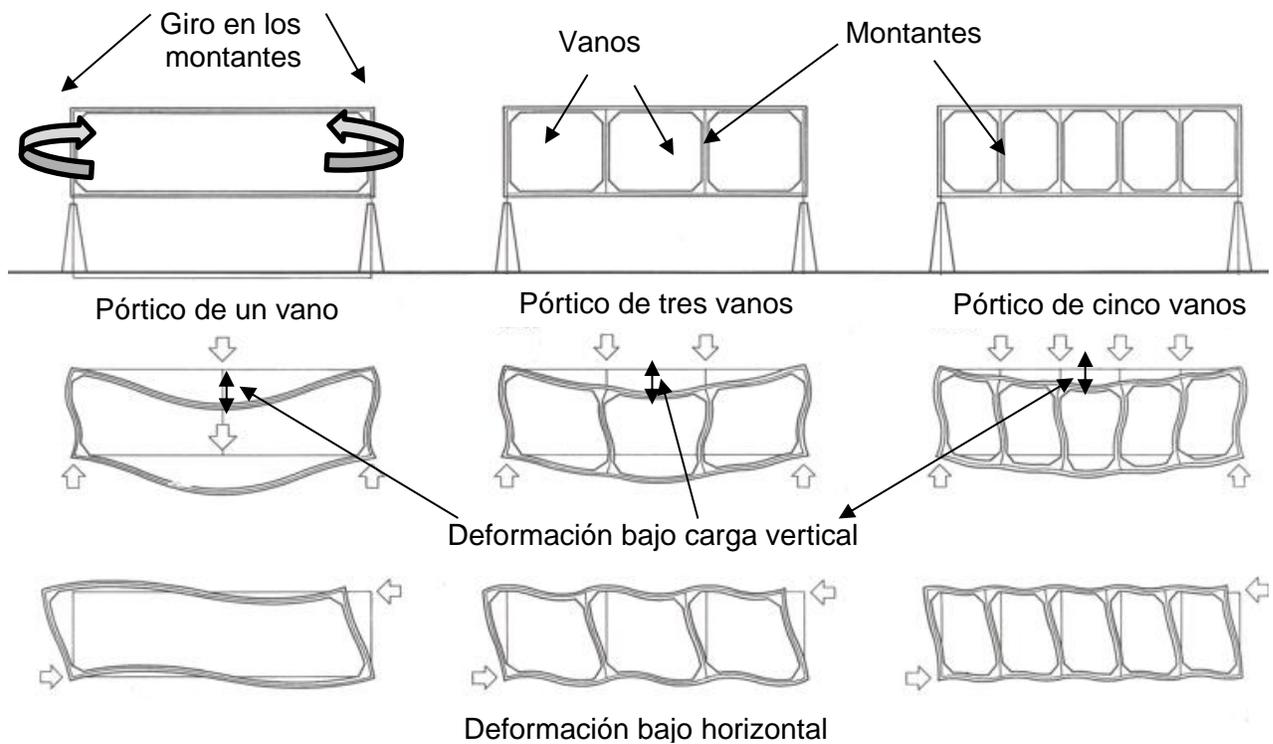
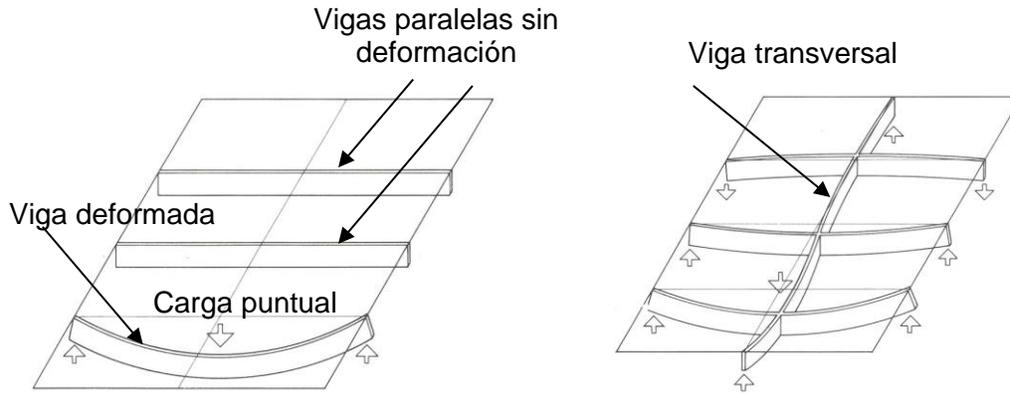


Fig. 2.20 Mecanismo de deformación de una viga Virendeel. (Imagen propia)

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

SA 3.- Retícula de vigas. Fig. 2.21



En las estructuras de vigas paralelas, sólo se deforma la viga sometida a la carga puntual. Las demás vigas no participan en el mecanismo de resistencia frente a carga puntual.

Al incorporar una viga transversal, en dirección perpendicular al sistema de vigas, una parte de la carga se transmite a las demás vigas paralelas. Todos los elementos de la estructura participan en el mecanismo de resistencia frente a la carga puntual.

Fig. 2.21 Esquema que muestra la influencia de las vigas ortogonales entre si al aplicarse una carga puntual. (Imagen propia)

Los sistemas de sección activa son los más utilizados, sin embargo, lo relevante de esta clasificación es el tipo de apoyo al que se somete el sistema. Ya sea una viga, un pórtico, o un sistema reticulado de vigas, su sección (su dimensionamiento) dependerá en parte del tipo de apoyo, ya sea empotrado, simple o articulado. Al comprender estos dos elementos apoyo-sección, se logra visualizar la versatilidad que brindan estos sistemas.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

2.3.4.- Transmisión de las fuerzas en estructuras de superficie activa (SUA)

Son sistemas de superficie flexible, pero resistentes a tracciones, compresiones y esfuerzos cortantes, en donde la transmisión de fuerzas se realiza a través de la resistencia de la superficie y una determinada geometría o forma. Ejemplo: cubiertas de láminas plegadas, estructuras de membranas.

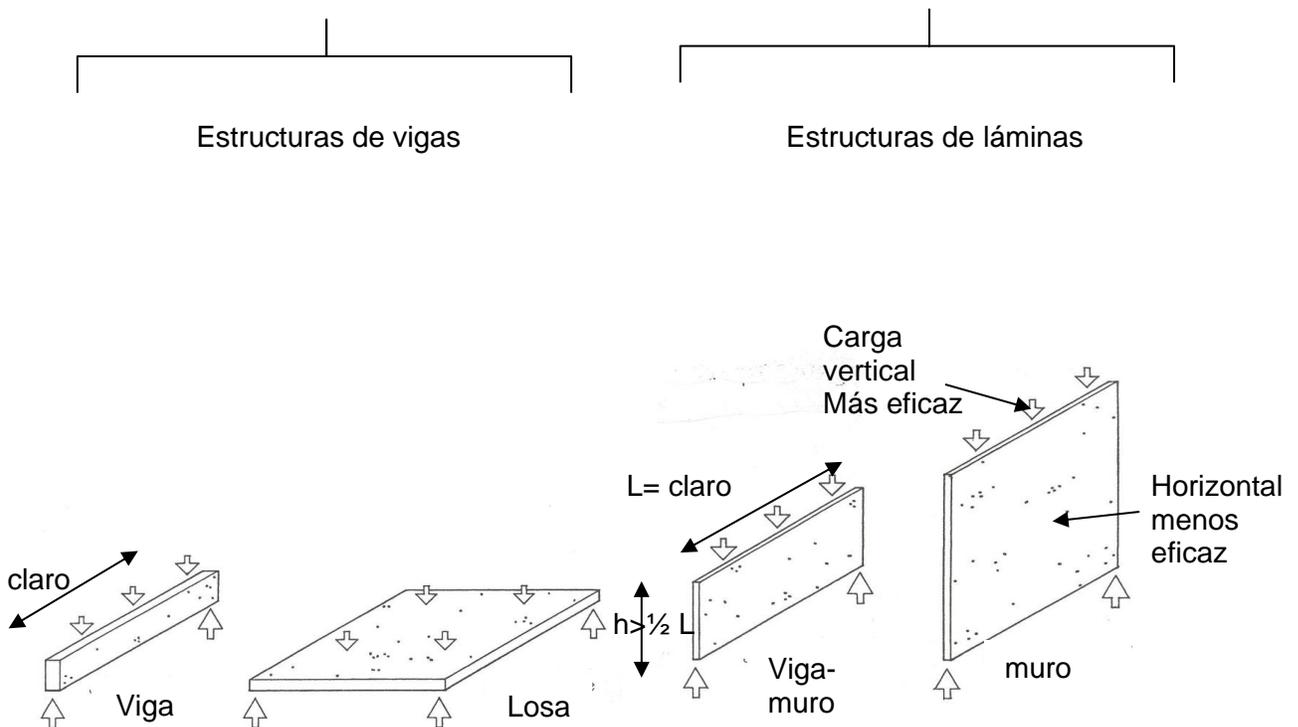
Las superficies estructurales pueden cubrir espacios y soportar cargas sin una serie de elementos auxiliares como vigas o columnas intermedias.

Cuando las superficies estructurales se unen para formar mecanismos capaces de transmitir fuerzas, se llaman estructuras de superficie activa. Su característica principal es la continuidad constructiva de los elementos en dos ejes, es decir, la resistencia superficial frente a compresiones, tracciones y esfuerzos cortantes. Cuando no hay continuidad en su superficie, se pierde la resistencia ante estos esfuerzos y empiezan a ocurrir grandes deformaciones.

La capacidad de las superficies portantes para transmitir esfuerzos depende de la geometría de la superficie respecto a la dirección de la fuerza actuante.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

SUA 1.- Estructura de Lámina. - El mecanismo portante de una superficie estructural es más eficaz si la superficie es coplanar a la dirección actuante de la fuerza externa, por ejemplo, en el caso de la gravedad, será la vertical; y es menos eficaz cuando la superficie es perpendicular a la dirección de la fuerza externa, en el caso de la gravedad, será la horizontal. Fig. 2.22



La distribución de los esfuerzos de placa difiere de la viga, cuando aumenta la altura de la estructura, a partir de $\frac{1}{2}$ de su claro.

Fig. 2.22 que muestra la diferencia entre viga y placa. (Imagen propia)

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

SUA 2 Lámina plegada. Tiene 3 comportamientos: Acción de losa, acción de placa y acción de cercha fig. 2.23

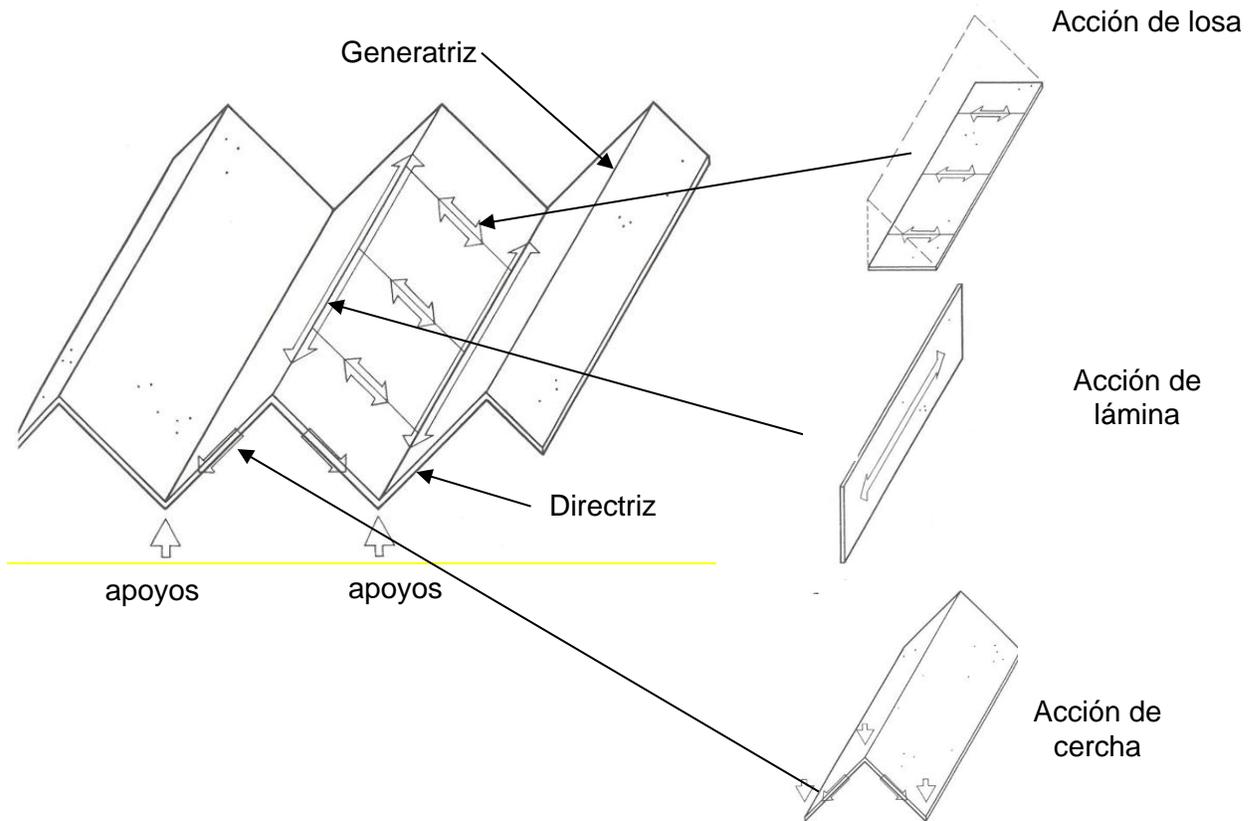


Fig. 2.23 Características de la Lámina plegada. (Imagen propia)

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

SUA 3.- Estructuras de membranas.

En la Lámina de curvatura simple. Fig. 2.24

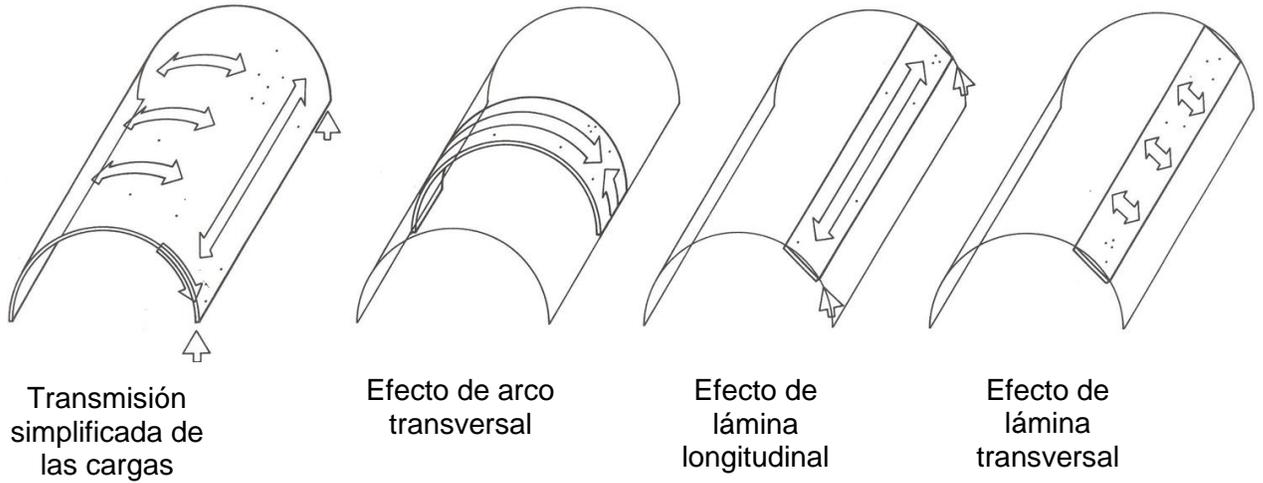


Fig. 2.24 Mecanismo estructural en superficies cilíndricas cortas y cilíndricas largas.
(Imagen propia)

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Membrana de paraboloides hiperbólico, fig. 2.25. El paraboloides hiperbólico tiene dos ejes transversales que se ayudan entre sí para lograr el funcionamiento de la membrana. A lo largo de un eje funciona como arco, mientras que, a lo largo de la otra dirección, funciona como un mecanismo suspendido. Cuando los esfuerzos de compresión tienden a deformar la membrana en un eje, los esfuerzos de tracción del otro eje tienden a contrarrestar esta deformación, esto ocurre de manera simultánea. (Engel, 2003 GG)

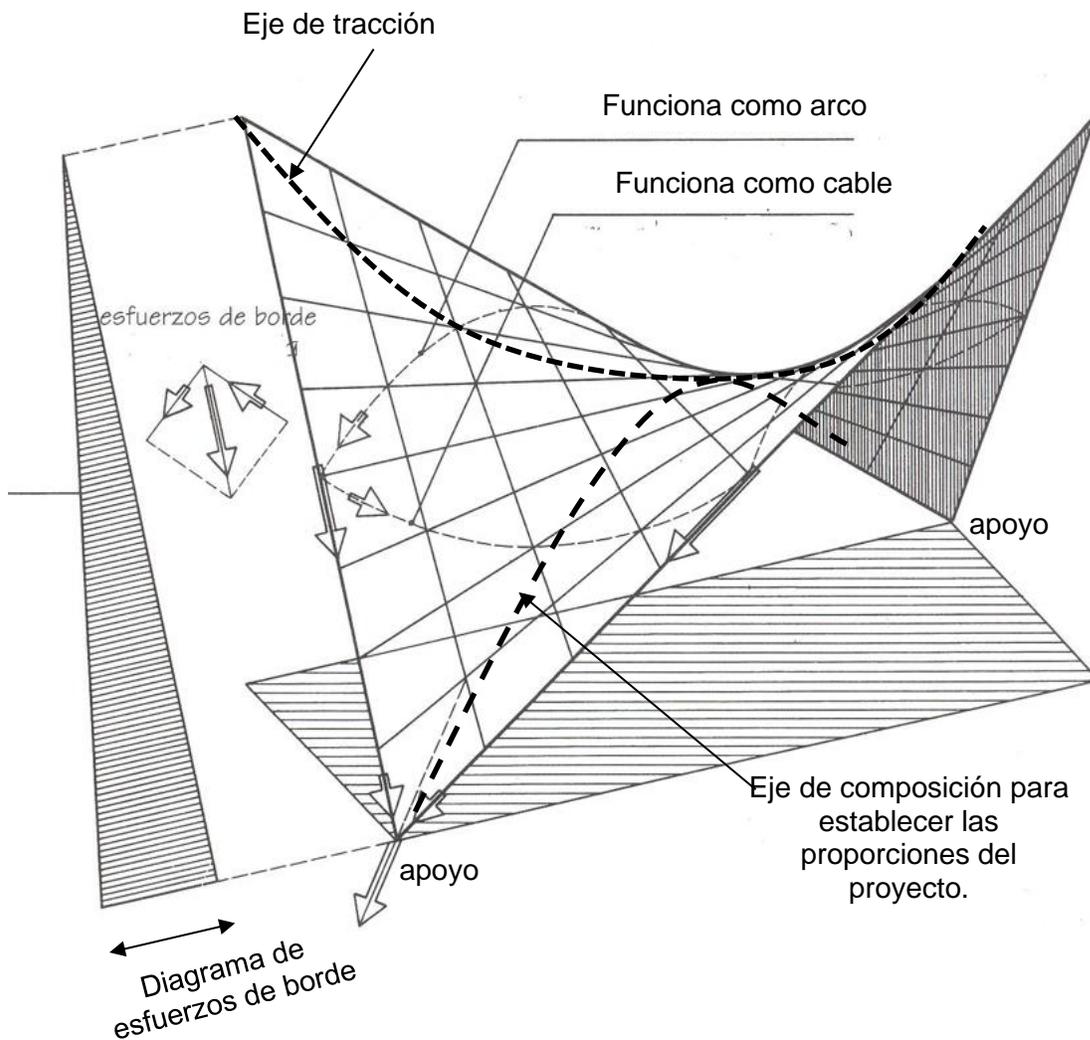


Fig. 2.25 Esquema del mecanismo del paraboloides hiperbólico de doble curvatura inversa. Imagen adaptada de Engel (2003)

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

El paraboloides tiene muchas aplicaciones en la arquitectura siendo los más conocidos los cascarones del Arq. Félix Candela Outeriño. En la en fig. 2.26, se muestra el planteamiento de un pabellón en donde los paraboloides plantean programas más flexibles, con la intención de que el espectador perciba la atmosfera de una cueva.

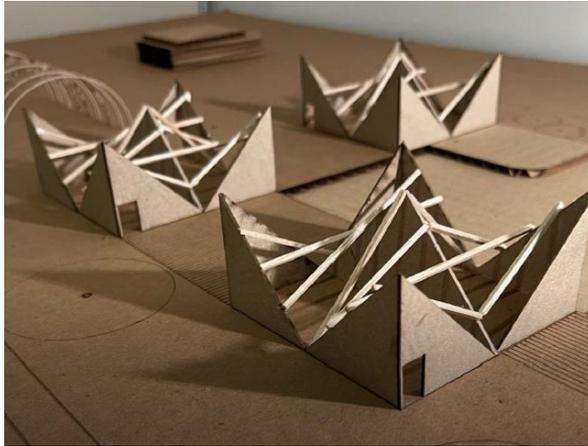


Fig. 2.26 Maquetas elaboradas por alumnos de la Universidad Anáhuac México en donde se muestra el paraboloides hiperbólico en la solución de una planta de conjunto. Fotografía por Norma González.

2.3.5.- Transmisión de las fuerzas en estructuras de altura activa (AA)

Estructuración en altura

Para garantizar que los rascacielos se mantengan en pie y sean seguros, se deben diseñar de manera que las cargas permanentes y accidentales se distribuyan correctamente a lo largo de la altura del edificio. Esto implica que cada componente del rascacielos debe estar alineado y conectado de forma que las cargas se gestionen de manera eficiente.

Rigidización Lateral.

Los elementos sólidos y rígidos que se desarrollan principalmente en sentido vertical suelen rigidizarse frente a cargas laterales y anclarse firmemente a la cimentación, por lo que pueden recibir cargas sobre superficies útiles situadas a gran altura sobre el suelo y transmitir las a la cimentación, es decir sistemas de altura activa, rascacielos.

Los rascacielos, figuras 2.27 y 2.28, tienen la característica de absorber y transmitir las cargas definidas con anterioridad y especialmente por la **rigidización lateral**. Para

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

transmitir las cargas, los rascacielos utilizan los mecanismos de forma, vector y sección activa, no poseen ningún mecanismo propio (Engel, 2003 GG).

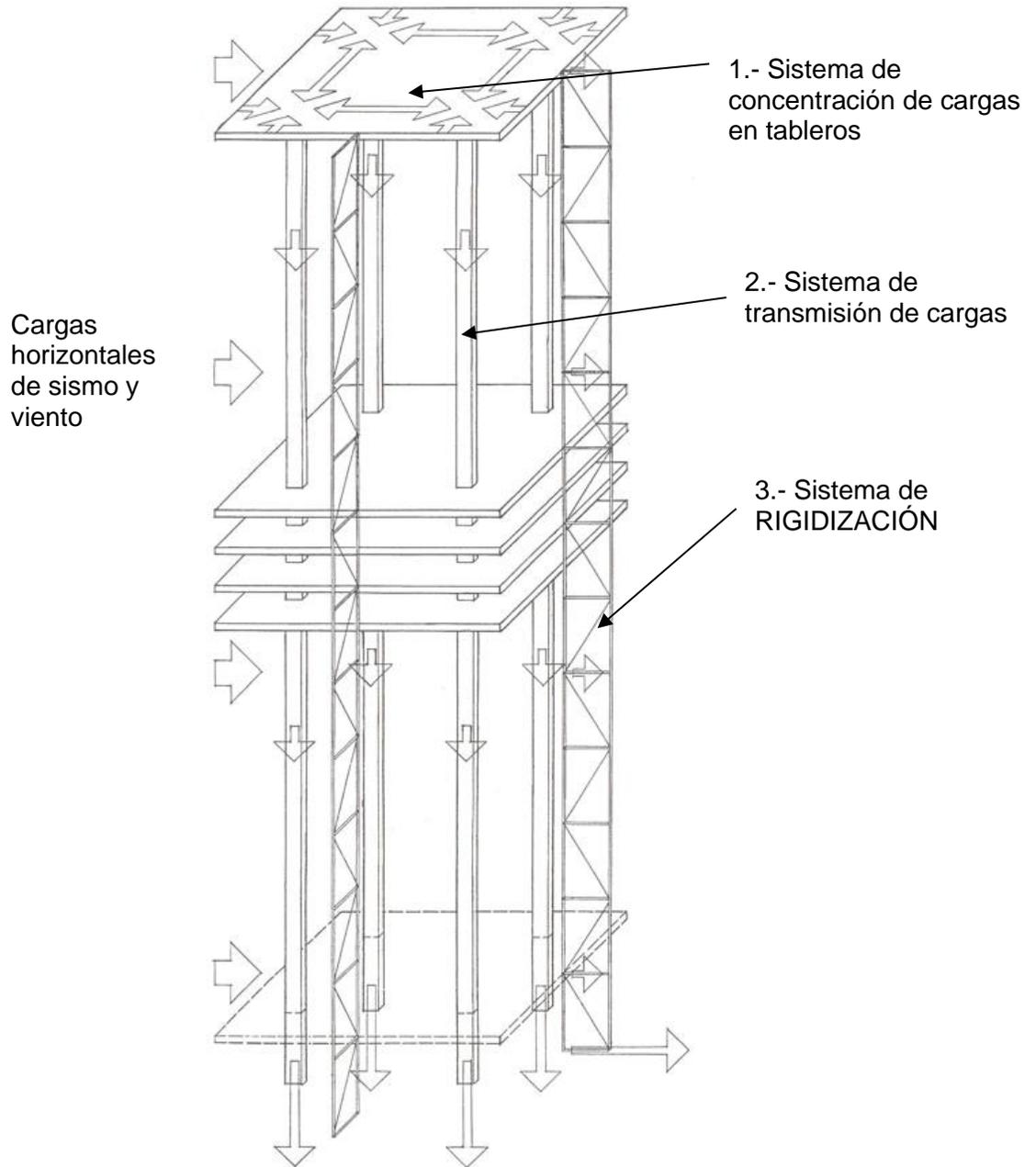


Fig. 2.27 El Mecanismo de transmisión de cargas de un sistema de altura activa se compone de tres sistemas: concentración de cargas, transmisión de cargas y rigidización.
(Imagen propia)

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Los edificios de altura activa integran con eficiencia los 3 sistemas, el de concentración de cargas en tableros, el de transmisión de cargas y de rigidización, el objetivo es que funcionen en conjunto 3 los sistemas.

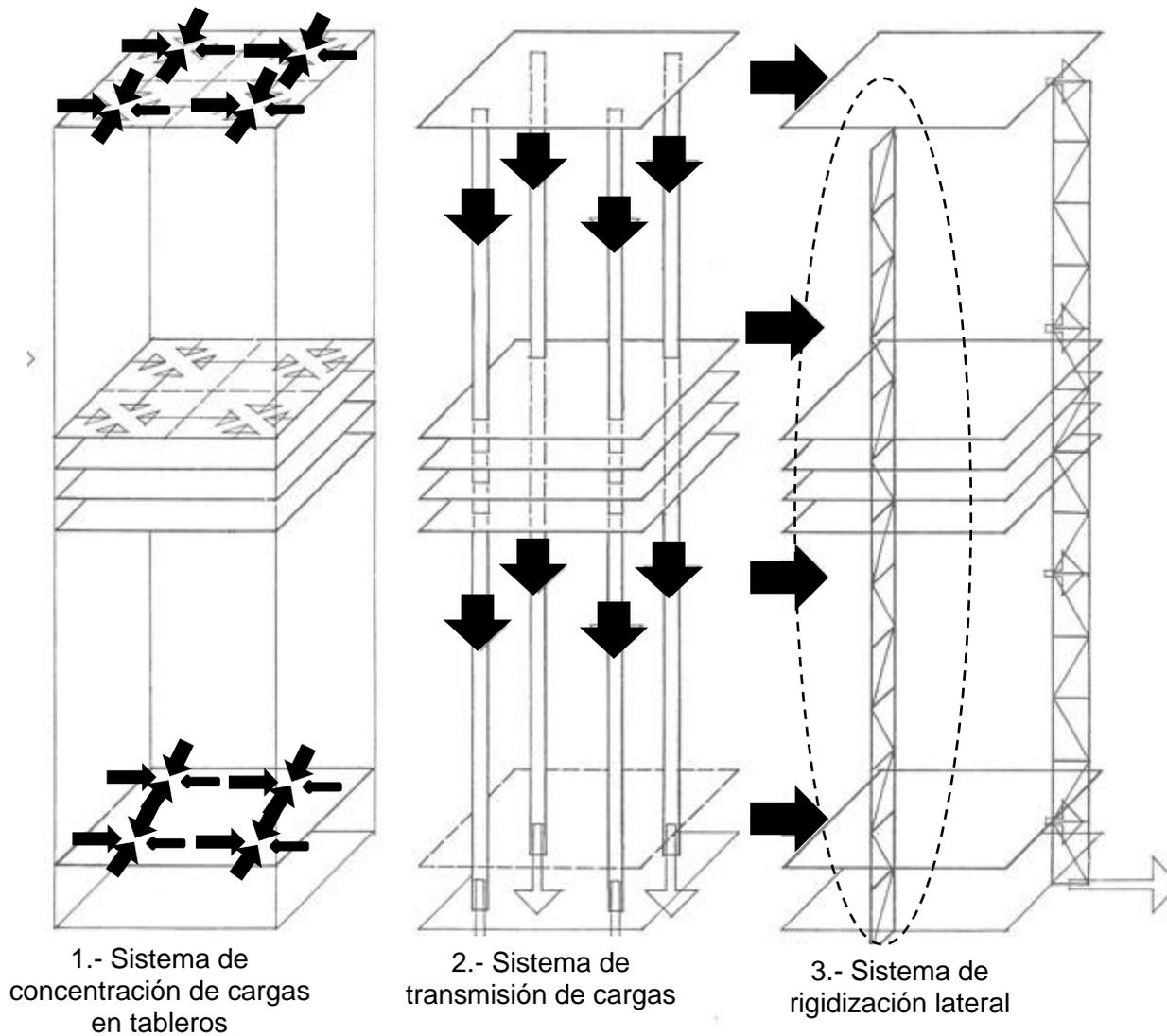


Fig. 2.28 Esquema de los 3 sistemas por separado.
(Imagen propia)

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

La implementación de los sistemas de rigidización además de los sistemas gravitacionales para la transmisión de fuerzas, ha ganado gran importancia a la hora de revisar los edificios por sismo, debido a la alta sismicidad y al suelo en el que se encuentra, detonando la necesidad de que las fachadas incorporen elementos como armaduras, muros de cortante o robustez en el sistema de pórticos. En la fig. 2.29 se muestra la maqueta del edificio Museo de Arte Contemporáneo de Nueva York elaborado por los arquitectos Kazuyo Sejima y Ryue Nishizawa¹⁹, el proyecto parte de la idea de apilar cajas de distintos tamaños y desplazarlas entre sí. El grado de rigidez de los nudos y el esquema de arriostramiento, hasta la resolución de distintos elementos son los que llevan al límite el potencial estructural.



Fig. 2.29 Edificio con sistema de rigidización para edificios altos. Maqueta elaborada por alumnos de la Facultad de Arquitectura UNAM. Fotografía por Norma González.

¹⁹ Sejima & Nishizawa (2024) The Pritzker Architecture Prize.
<https://www.pritzkerprize.com/biography-kazuyo-sejima-and-ryue-nishizawa>

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Los edificios altos son estructuras de marcos rígidos, en donde los mayores desplazamientos horizontales por el esfuerzo cortante se producen en la base, por lo que la rigidez de la estructura se observa en lo alto del edificio.

Por otro lado, en las estructuras con muros que resisten esfuerzos cortantes, el momento flexionante produce desplazamientos máximos en la parte más alta, por lo que la rigidez de la estructura se observa de la parte más baja. Fig. 2.30

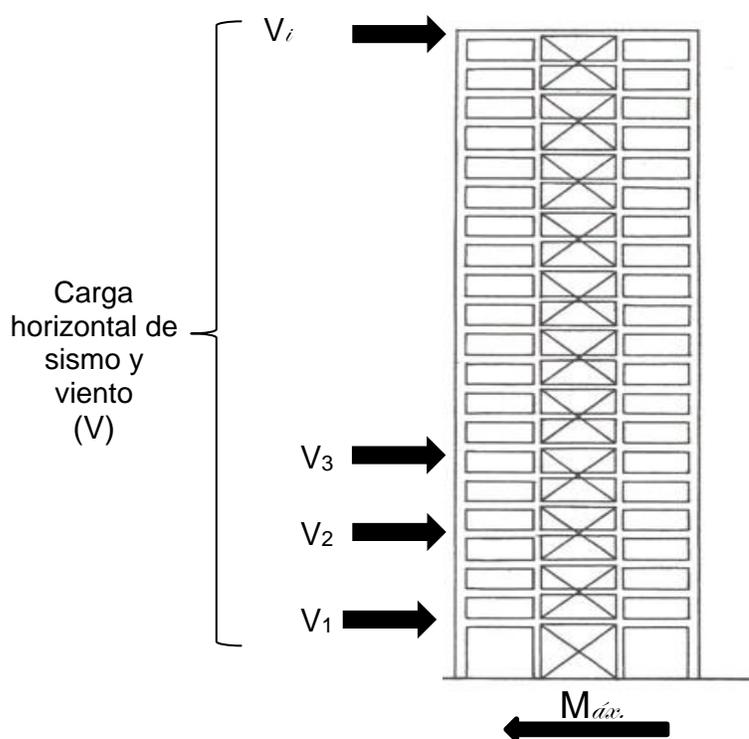


Fig. 2.31 Esquema que representa el cortante V_i propagado en cada nivel y la fuerza cortante máxima en la base del edificio. (Imagen propia)

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Para explicar mejor lo anterior, se puede comparar al rascacielos como una viga empotrada en voladizo, en donde se debe rigidizar muy cerca del empotramiento para evitar mayores deformaciones en el punto más alejado del empotramiento. Fig. 2.32

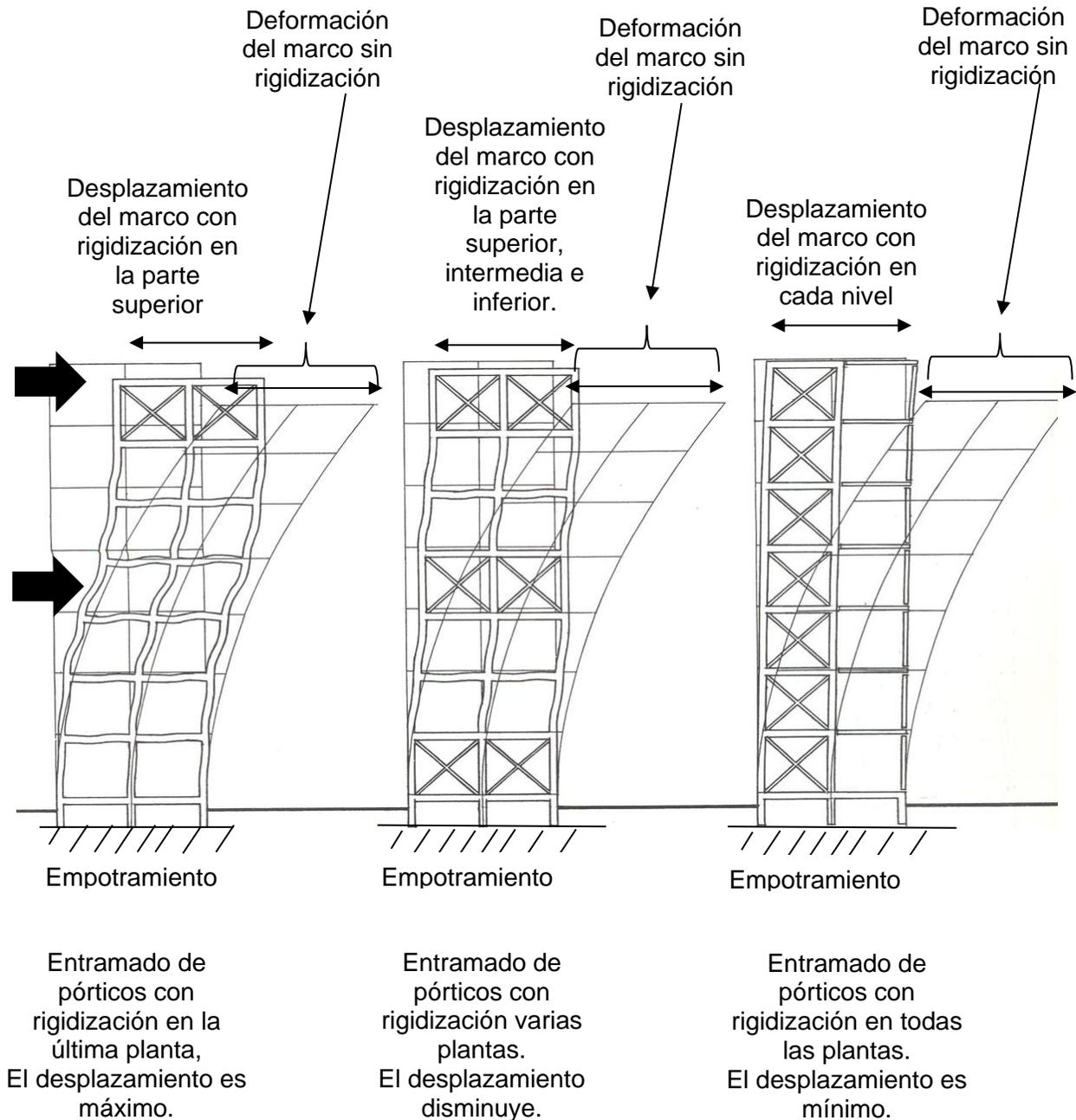


Fig. 2.32 Esquema que representa la rigidización y su desplazamiento. (Imagen propia)

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Sistema de tubos de rigidización vertical, fig. 2.33. Estos tres sistemas permiten rigidizar el rascacielos de tres maneras posibles: Pórtico, láminas y celosías.



Pórtico



Láminas



Celosías

Fig. 2.33 Fotografías que muestran los 3 sistemas habituales de rigidización en edificios de la Ciudad de México. Fotografías por Norma González en septiembre de 2024.

Algunas variantes de los sistemas de lámina y de núcleo más comunes de rigidizar un edificio de altura activa. Fig. 2.34

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

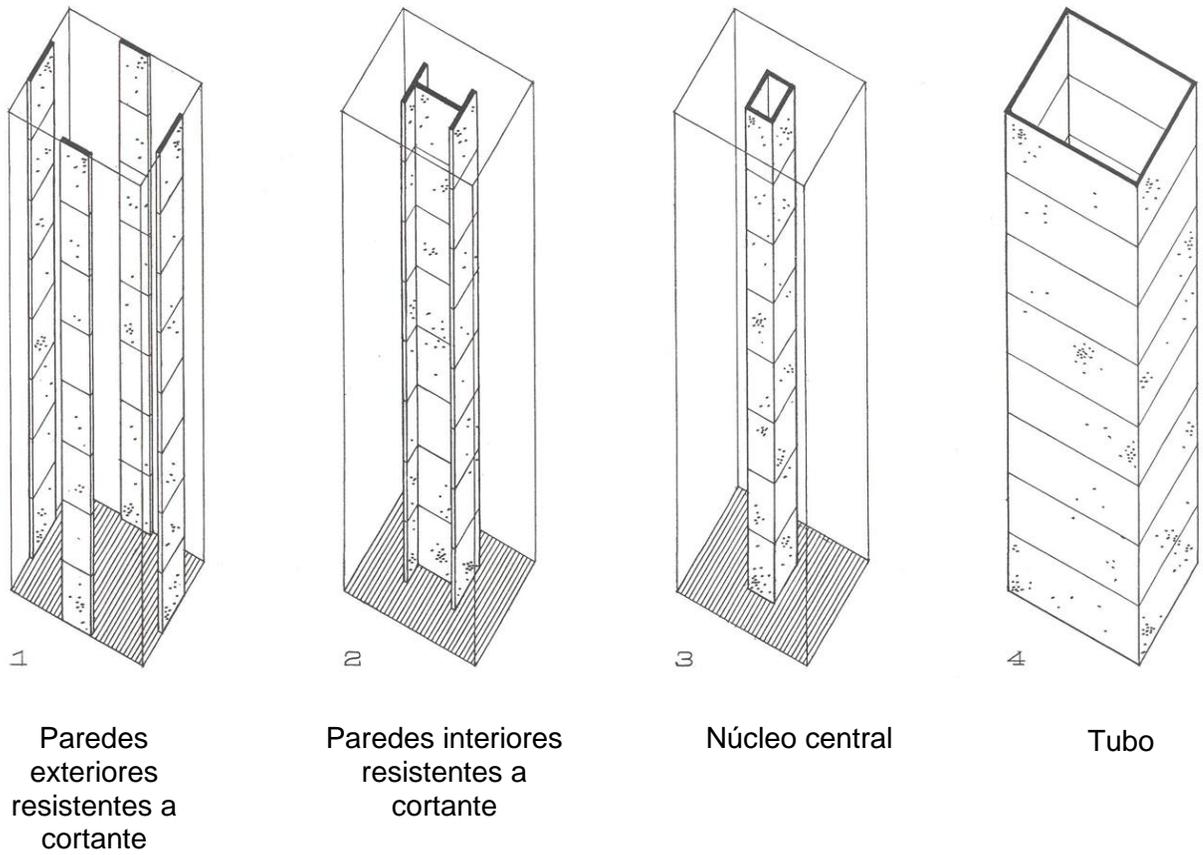


Fig. 2.34 Esquema que representa la rigidización con núcleo y muros. (Imagen propia)

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Conclusiones del capítulo 2.

En este capítulo se estudian los sistemas estructurales de acuerdo con la clasificación de Heino Engel, se observa que no existe la posibilidad de separar la manera en la que se transmiten las fuerzas de la forma que otorgan, están intrínsecas en su naturaleza. Esta observación es lo que orilló a Heino Engel a organizar las fuerzas en función de su naturaleza.

CAPÍTULO 3
Estructuras arquitectónicas.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

3.1 Definición de estructuras arquitectónicas.

Una vez que se han clasificado los sistemas estructurales, se ahondará en el tiempo durante el cual se propone visualizarlos como opciones de diseño para ser abordados durante la concepción del proyecto arquitectónico.

Cuando el sistema estructural es tomado en cuenta desde un inicio temprano de la concepción del proyecto, se les llamará estructuras arquitectónicas. Es decir, las estructuras arquitectónicas se refieren al hecho específico cuando el alumno plantea las soluciones de su intención arquitectónica y al mismo tiempo plantea, de acuerdo con la taxonomía planteada en el capítulo 2 y la metodología MOOA, el sistema estructural que hace posible su espacialidad y habitabilidad.

3.2 Definición de estructuras convencionales.

Cuando el sistema estructural no es tomado en cuenta durante el proceso de la intencionalidad arquitectónica, sino hasta cuando el proyecto arquitectónico está concluido, se les llamará estructuras convencionales. Como ejemplo de este tipo de estructuras convencionales, se piensa en un alumno de arquitectura, que plantea una solución constructiva de su proyecto, piensa solo en la materialidad antes de considerar la estructura y con este proceso se tiene la idea de que el sistema estructural ya fue tomado en cuenta, este proceso poco le permite explorar la taxonomía de los sistemas estructurales y explorar las posibilidades en la relación forma-estructura.

Se identifica que las estructuras convencionales, son aquellas que, cuando se concibieron, no fueron visualizadas desde la óptica del diseño estructural ni tampoco por su forma, por lo que, una vez desarrollado el proyecto arquitectónico y su materialidad, cuenta con una única posible solución estructural. Podemos decir que una vez que el proyecto ha sido elaborado, queda ya muy poca exploración creativa de sistemas estructurales como opciones que proponer para el proyecto, porque la forma arquitectónica será materializable a partir de uno o dos sistemas estructurales, que, al seguir en el proceso de diseño arquitectónico, pasará inmediatamente al análisis estructural, y seguramente durante ese paso, el proyecto original arquitectónico sufrirá cambios de fundamento en su original propuesta conceptual.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

3.3 Distinción entre Analista y diseñador de estructuras.

En algunos casos, el proceso de Diseño estructural (estructuración) se delega totalmente al criterio del ingeniero o estructurista, (que generalmente carece de una formación académica sobre conceptos arquitectónicos) y, si en la selección del sistema estructural, no interviene el arquitecto diseñador, es muy probable que su diseño original, termine siendo modificado.

Para solucionar esta problemática, que provoca un cisma entre ambas profesiones, se hará la distinción entre el analista de estructuras y el diseñador de estructuras.

Se plantea en este trabajo, la definición dada por Vázquez²⁰ :

- El análisis de estructuras es el conocimiento cuantitativo sobre cómo se comporta una estructura bajo carga.
- El diseño de estructuras es el conocimiento cualitativo acerca de qué estructura se requiere para sostener un sistema de cargas.

El analista intenta 'ver' cómo tiene que deformarse la estructura ('mínima energía potencial'), allí donde el diseñador intenta 'ver' cómo deben conducirse las cargas hacia el suelo ('mínima cantidad de estructura'). Desde luego, nada impide la existencia de un diseñador/analista, pero desempeñar ese doble papel parece esencialmente más difícil (Vázquez ,1997).

El arquitecto en la actualidad, ante este tipo de estructuras convencionales, no funge como diseñador estructural²¹. Delega todo el proceso de diseño estructural a los ingenieros, que a su vez delegan al software que usen, por lo que esta se cataloga como una característica más de las estructuras convencionales.

En estas estructuras convencionales, las expectativas arquitectónicas del planteamiento del proyecto seguramente no terminarán materializándose, siendo que surgirán nuevas cualidades que serán evaluadas para una segunda intención arquitectónica, que se llevará a un segundo intento de estructuración. Este proceso, lleva consigo un sin número de propuestas y modificaciones que toman tiempo y dinero que repercuten directamente en la toma de decisiones final, ver Fig. 3.1

²⁰ Ítem

²¹ Vázquez, Mariano (1997). Sobre la enseñanza y práctica de la teoría de estructuras. Dpto. de Estructuras de Edificación. Univ. Politécnica de Madrid. Revista: Informes de la Construcción, Vol. 49, n° 449, mayo/junio

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

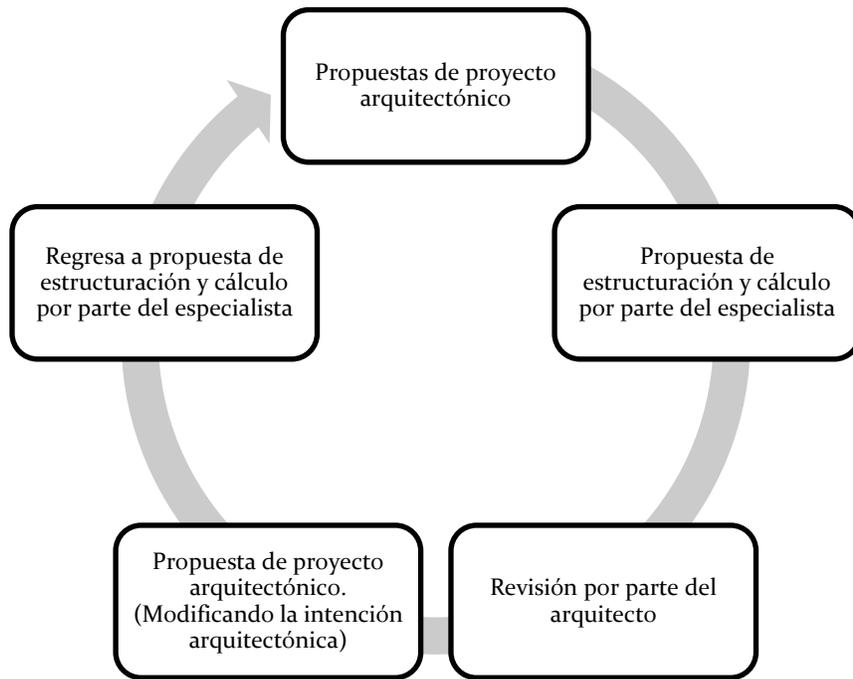


Fig. 3.1 Proceso convencional de estructuración. (*Estructuras convencionales*).
(Imagen propia)

En las estructuras convencionales la definición del proyecto arquitectónico queda supeditada exclusivamente a su forma, síntesis creativa y exenta de toda participación del diseñador de estructuras. En las estructuras convencionales no existe ninguna intervención, del diseñador estructural durante el proceso creativo. Esta metodología de diseño permite identificar una crisis en el alumno, que ocurre cuando se ve en la necesidad de estructurar su proyecto, carece de las herramientas suficientes, es decir, no tiene argumentos estructurales válidos para integrar la estructura en el proyecto de manera armónica y sobre todo que enriquezcan la intencionalidad arquitectónica.

3.4 Planteamiento oportuno de las Estructuras Arquitectónicas.

En una definición de arquitectura como la que acontece a muchas Universidades, el proyecto arquitectónico queda definido como el correcto planteamiento de los conceptos arquitectónicos que dan lugar a la forma.

Sin embargo, en este trabajo se plantea el sig. Corolario:

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Un correcto planteamiento de conceptos espaciales durante el proyecto arquitectónico tiene diferentes soluciones estructurales, que pueden limitar o enriquecen a la propia forma arquitectónica.

Es decir las acciones horizontales (sismo, viento, etc.), que se ejercen sobre un edificio de varios pisos, o formas irregulares, tiene diferentes soluciones estructurales (separación entre columnas, muros arriostrados, fachadas arriostradas, sistema de tubo, etc.), pero depende del arquitecto, el correcto planteamiento del sistema estructural para lograr la expresión arquitectónica deseada, siendo estas: proporción, habitabilidad, iluminación, volumen, simetría, sensaciones espaciales, escala, orden, etc.

Charles Andrew²² lo describe así: “Dentro de una misma envolvente constructiva, surgen cualidades espaciales diferentes al variar los esquemas estructurales interiores, siendo todos ellos viables desde la perspectiva de la ingeniería estructural”.

Se define entonces que, para una estructura convencional, la propuesta en su solución no radica en variar los sistemas estructurales, ni en la oportuna intervención del diseño estructural, sino que su planteamiento enfatiza una única solución final, que limita a la forma arquitectónica, ya sea por el análisis de las fuerzas s que hacen inviable la materialización del concepto o bien por su propia naturaleza de diseño.

Finalmente, el proceso de cálculo para los dos sistemas estructurales –convencionales y estructuras arquitectónicas conlleva a los mismos pasos descritos anteriormente, lo que se altera es el proceso de estructuración o, mejor dicho, el “tiempo adecuado” en el que se hace la estructuración o diseño estructural del proyecto. Este “tiempo adecuado” queda definido por el instante en el que la estructura interviene en la configuración del proyecto arquitectónico, es decir, que, en las estructuras convencionales, habitualmente la estructuración se observa como un simple cálculo o análisis en la última etapa, al final de las ideas arquitectónicas preconcebidas, sin haber sido incluidas los principios estructurales, en donde el diseño estructural no tiene lugar.

Entonces es importante decir que la estructuración y elección de diferentes sistemas estructurales, debe ser incorporada en el momento adecuado, al principio y junto con los conceptos arquitectónicos. Esta idea da lugar al concepto de “Estructuras Arquitectónicas” y a una metodología práctica que se plantea oportunamente más adelante.

²² ítem

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Se identifica entonces que el estudiante de arquitectura, el docente y el arquitecto diseñador, deben *conocer la importancia del análisis de las fuerzas para diversos sistemas estructurales* y el reglamento de construcciones, así como sus reglas técnicas complementarias y lograr comprender el dimensionamiento de diversos elementos, para lograr realizar un diseño estructural viable que al final del camino, no sufra de tantas modificaciones al proyecto, debido a lo irreal del planteamiento, ver Fig. 3.2

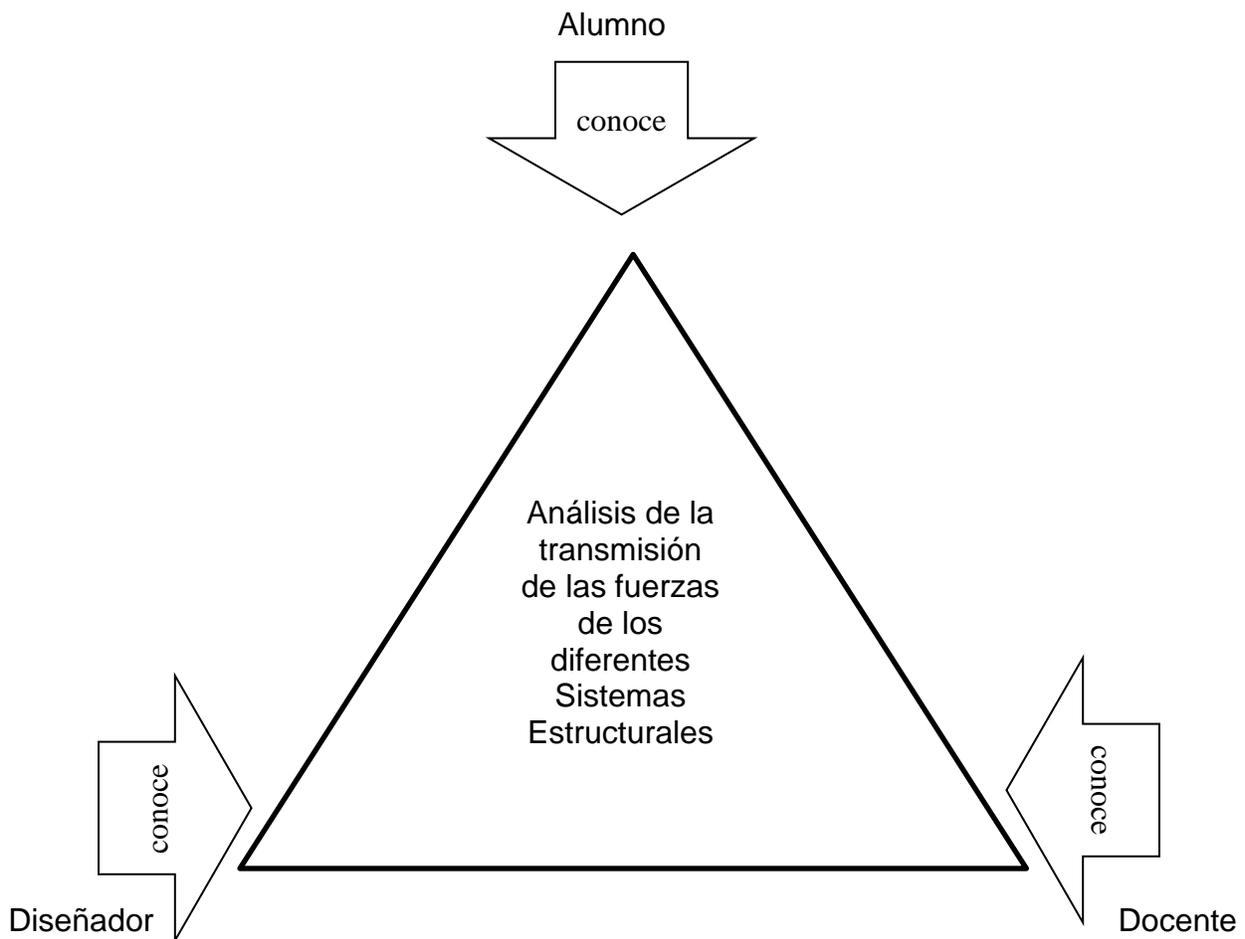


Fig. 3.2 Triángulo didáctico sobre los participantes durante la concepción arquitectónica. Imagen propia.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

3.5 La estructura que da la Forma Arquitectónica.

Con la finalidad de analizar las relaciones entre la estructura que da forma y la que sigue la forma, se plantea una interpretación sobre la expresión propuesta como “*estructuras arquitectónicas*”. Definidas intencionalmente bajo algunas características restringidas ya sea su volumen o su expresión exterior e interior. “La realidad de buena parte de la actividad profesional de proyectar, es que la estructura rara vez genera la forma arquitectónica, más bien, da una respuesta que cumpla con el programa y que, en teoría sea coherente con las ideas funcionales del proyecto”²³ .

Las estructuras arquitectónicas se plantean en este trabajo, como una Interpretación de la composición arquitectónica desde la clasificación de los sistemas estructurales.

Se estudia que en la actualidad la forma arquitectónica se distingue de la forma estructural, visualizando que los proyectistas pueden aprovechar estas diferencias para una mayor riqueza arquitectónica. Charleson desvincula y define de una manera muy oportuna, la forma arquitectónica de la forma estructural, porque así se pueden aclarar ambos conceptos nebulosos pero muy habituales. De esta manera, surge también la oportunidad de estudiar los sistemas estructurales como el medio para proponer la forma arquitectónica que resulta como un elemento integrador.

La “Forma arquitectónica”, la define Francis Ching²⁴ como el contorno exterior o figura de un edificio como primer lugar y en segundo lugar a su organización interna y a sus rasgos unitarios. Esta figura comprende varias propiedades visuales y relacionadas, como son: proporción, color, textura, posición, orientación e inercia visual. En su opinión, la forma se suele entender en primer lugar como la figura o la volumetría tridimensional, pero también comprende aspectos arquitectónicos adicionales como la configuración espacial y la geometría estructural. Se empleará el término de “forma arquitectónica” a la figura tridimensional o volumetría del edificio. Este planteamiento permite estudiar el procedimiento que comúnmente se sigue durante el proyecto arquitectónico y donde se define el concepto del proyecto integral arquitectónico que permite crear a las estructuras arquitectónicas.

La “forma estructural” es definida por el doctor López Carmona como la *morfología*. En Ingeniería estructural se definen a las estructuras como esqueletos o sistemas de barras

²³ Charleson, Andrew (2007). La Estructura como arquitectura. Formas, detalles y simbolismos. Ed. Reverté. pág. 67.

²⁴ Ching, Francis (1982), Architecture: Form, Space and Order, (1979) 2a Ed. Van Nostrand Reinhold, Nueva York, 1996; versión castellana: Arquitectura; espacio y orden. Gustavo Gili, Barcelona y México, 1982, 2a edición.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

que soportan las cargas y las transfieren²⁵ hacia las bases de apoyo. El doctor Roberto Meli, define: “*El esqueleto del edificio que resiste esas fuerzas, es la estructura, la parte fundamental para la seguridad*”²⁶. Se entiende que, la forma estructural es el sistema estructural que definido por diferentes elementos estructurales permiten crear diferentes formas estructurales, en dónde se distinguen dos tipos de formas:

- **La estructura que sigue la forma.** En la actualidad es el proceso de las estructuras convencionales donde se trabaja el diseño arquitectónico independiente del diseño estructural, los pasos son los siguientes:

Interiorización del problema. El conocimiento profundo de los aspectos relacionados con el proceso del diseño. La arquitectura supone la limitación de un espacio cuyo programa arquitectónico permite realizar una cierta actividad humana.

La intervención del estructurista en el proceso del diseño del objeto arquitectónico comienza después de estar realizado el proyecto de la futura edificación proyectada.

- **La estructura que da forma.** Es un proceso de diseño más integral donde el proceso creativo de la forma se vincula con la estructura arquitectónica y suele seguir los siguientes pasos. Ver Fig. 3.3

Interiorización del problema. El conocimiento profundo de los aspectos relacionados con el proceso del diseño y los materiales para poder proponer variantes.

La concepción de las formas espaciales. Como un proceso de ideas razonables, conceptos e intenciones expresadas gráficamente para lograr la materialización práctica de esas geometrías durante la ejecución.

Intervención del diseñador de estructuras. Realizar una investigación sobre diferentes esquemas estructurales alternativos y su influencia sobre el espacio interior desde la fase preliminar del proyecto.

Corporizar la forma limitativa envolvente (morfología), para lograr un espacio mediante el orden y disposición de diversos elementos estructurales básicos²⁷ en función de un material que logre de acuerdo con sus características físicas y estructurales dar cuerpo a las ideas de formas iniciales.

²⁵ Elementos finitos: Cálculo por el método de elementos finitos.

²⁶ Explicación del Dr. Meli en entrevista acerca del tema de los sistemas estructurales.

²⁷ Gómez, Raúl. Facultad de Arquitectura de la Universidad de Guadalajara. Estructura y Precálculo. Apuntes de la materia de Estructuras para alumnos de arquitectura.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

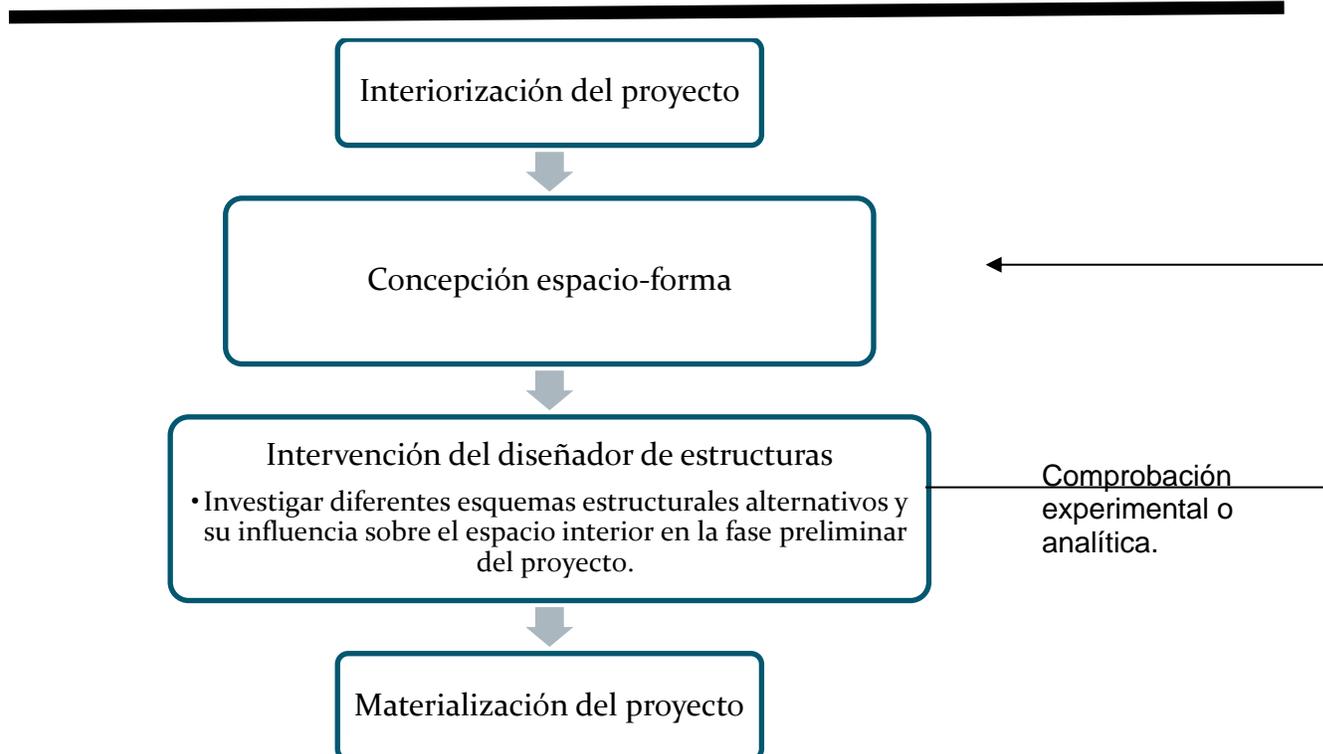


Fig. 3.3 Diagrama del proceso creativo de las estructuras arquitectónicas. Imagen propia

3.6 Características de las estructuras arquitectónicas

1.- Exhiben claridad del planteamiento estructural. Están pensadas desde su concepción como un elemento integral del proyecto arquitectónico, además de funcionar como soporte resistente y esquelético del edificio: “La Estructura es el elemento protagonista y potente de la forma, hasta el punto de que, si no es considerado en la larga serie de decisiones que condicionan la forma, distorsiona o modifica todos los demás factores determinantes de un edificio. En ese caso deduciríamos que la estructura ha dictado todos los demás aspectos del proyecto²⁸”.

2.- Exhiben la naturaleza de su forma una diferencia entre estructuras que siguen la forma y entre estructuras que dan forma. Apoyándose en la taxonomía de los sistemas estructurales según Heino Engel.

²⁸ Charleson, Andrew (2007). La Estructura como arquitectura. Formas, detalles y simbolismos. Ed. Reverté. pág. 37.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

3.- Las cualidades geométricas son llamadas la forma de las superficies.²⁹

4.- Se ha realizado una serie experimental de diferentes sistemas estructurales para el mismo planteamiento arquitectónico. Realizándose un bosquejo de varias opciones estructurales una vez definido el programa y el concepto arquitectónico.

5.- La elección del sistema estructural y por consiguiente de la estructuración del proyecto arquitectónico, se hace desde la primera etapa de la composición y no al final cuando ya el proyecto está terminado y no existen más opciones que favorezcan al diseño. Es decir, las estructuras arquitectónicas son concebidas desde el diseño estructural según lo planteado anteriormente. El arquitecto, es el encargado de elegir el sistema estructural, funge como diseñador estructural, donde *la forma arquitectónica y el diseño estructural nacen simultáneamente*.

6.- Correcto planteamiento estructural. Correcto diseño estructural. Es decir, se posee del conocimiento sobre la clasificación de los sistemas estructurales (taxonomía propuesta en el capítulo 2) y su análisis de transmisión de fuerzas, adecuado a conceptos básicos de resistencia, reglamento de construcciones con sus debidas Normas Técnicas Complementarias, que definirán con claridad el planteamiento de la forma estructural. Pero el correcto planteamiento estructural, está dado por el conocimiento básico de todos los sistemas estructurales y su correcta elección para conseguir la forma espacial adecuada al proyecto arquitectónico.

7.-Para una estructura arquitectónica, la propuesta en su solución radica en poder hacer variantes de los sistemas estructurales de manera oportuna en el diseño estructural, y su planteamiento enfatiza varias soluciones finales para adecuar la forma arquitectónica, ya sea por el análisis de las fuerzas externas e internas que hacen viable la materialización del concepto o bien por su propia naturaleza geométrica.

El listado anterior ofrece un acercamiento para poder visualizar una comprensión más clara pero no absoluta de estas estructuras llamadas estructuras arquitectónicas. Para acercarse más a esta caracterización, se busca un planeamiento en torno a diversos objetos arquitectónicos y a integrar tanto la arquitectura como la estructura.

²⁹ Basterra, Alfonso (1988). Las estructuras arquitectónicas de Félix Candela. Una revisión actual. Departamento de Edificación. Universidad de Valladolid. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Junio .Pág. 143.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Si bien durante el proceso de concepción del objeto arquitectónico ya está definida su forma de manera preliminar, es el momento preciso para iniciar el proceso de selección de la estructura.

En cuanto a sus cualidades geométricas, Heino Engel³⁰ opinaba en su libro que: “En general, la geometría es la teoría que determina de forma exacta los lugares en el espacio, las leyes de las figuras planas, tridimensionales y su forma externa. Por consiguiente, la geometría es un instrumento indispensable para dar forma al entorno material y espacial tanto de los edificios como de sus estructuras. La geometría es la disciplina en la que se fundamenta la función de formalización y proyección del Ingeniero y del Arquitecto” (Engel, 2003 GG). Con estas palabras, Engel da por sentada la materialización, la espacialidad del objeto arquitectónico y la necesidad del objeto de ser materializado. Es decir, para pasar del concepto de la forma proyectual a la materialización es necesaria una buena representación geométrica.

3.7 El planteamiento estructural.

Las estructuras arquitectónicas deben poseer –además de las características ya mencionadas- un planteamiento válido de diseño sísmico, para esto es necesario contar con conocimientos básicos de diferentes temas del análisis de fuerzas tanto verticales como horizontales a las que estará sometido un edificio, y la posible respuesta a estos esfuerzos. Pero sobre todo de cuáles son los elementos estructurales y su tipología que permitirán que el proyecto sea viable sísmicamente hablando.

Si bien no es necesario ser un especialista en el tema del cálculo, si es necesario poder visualizar y entender de manera oportuna cómo conducir las fuerzas actuantes hasta la zona de apoyos.

El proceso de cálculo tiene el siguiente orden,

- 1.- Análisis de acciones.
- 2.- Análisis estructural
- 3.- Diseño estructural

³⁰ Ib.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

1.- El análisis de acciones es la cuantificación de las cargas permanentes, variables y accidentales.

2.- El Análisis estructural consiste en la comprensión y cuantificación de:

- Esfuerzos de tracción y flexión.
- Esfuerzos de Compresión
- Esfuerzos de Torsión
- Momentos y Cortantes.
- Acciones por gravedad.
- Acciones horizontales. Sismo y viento.
- Desplazamientos.

3.- El diseño estructural, en la actualidad, busca dimensionar correctamente la estructura, en función de los resultados del análisis estructural, obtenido por un software.

En esta secuencia, se observa que no hay un diseñador de estructuras. El proceso empieza cuando ya está definida la estructura. Aquí es donde interviene el arquitecto diseñador de estructuras que debe contar con conocimientos sobre la taxonomía de los sistemas estructurales propuesta en el capítulo 2, y del conocimiento de la normativa que rige el proyecto.

3.8 El complejo sistema de cálculo de la Ingeniería Sísmica.

El reglamento de construcciones del Distrito Federal (2017), junto con sus normas técnicas complementarias de diseño por sismo 2023, *prioriza el diseño por sismo de estructuras nuevas*. Por todos es sabido que esto se debe a las características geológicas de la ciudad de México y a que gran parte del República, se encuentra en zona de placas de subducción.

Hasta antes del sismo de 1985, el reglamento permitía un diseño sísmico estático simplificado, este método, permitía al arquitecto hacer pre-dimensionamientos muy cercanos al dimensionamiento final de toda la estructura e intuir la forma estructural que hacía posible la forma arquitectónica. El análisis estructural, era simple y práctico.

Si bien ya había edificios que se estaban diseñando con métodos dinámicos lineales, era un conocimiento aislado, que se gestó en el ámbito de la ingeniería estructural y no se permeó al ámbito académico de la arquitectura, dejando al arquitecto sin herramientas para hacer pre-dimensionamientos o planteamientos estructurales viables. Además, las formas arquitectónicas pasaron de ser regulares, a ser edificaciones irregulares en planta y altura.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Con los softwares de análisis estructural el análisis pasó de ser simple, a mucho más refinado, incluyendo el análisis dinámico no lineal y el futuro de la ingeniería sísmica: el diseño basado en resiliencia, que es la capacidad de un sistema para adaptarse, resistir, cambiar y recuperarse de un evento catastrófico de manera oportuna para mantener un sistema aceptable de funcionamiento (Gutiérrez, Ayala 2022)³¹.

En la siguiente línea del tiempo (fig. 3.4), el doctor Amador Terán³², muestra el desarrollo del análisis de edificios y hacia dónde deviene en las actualizaciones del 2023, el diseño por sismo de edificios.

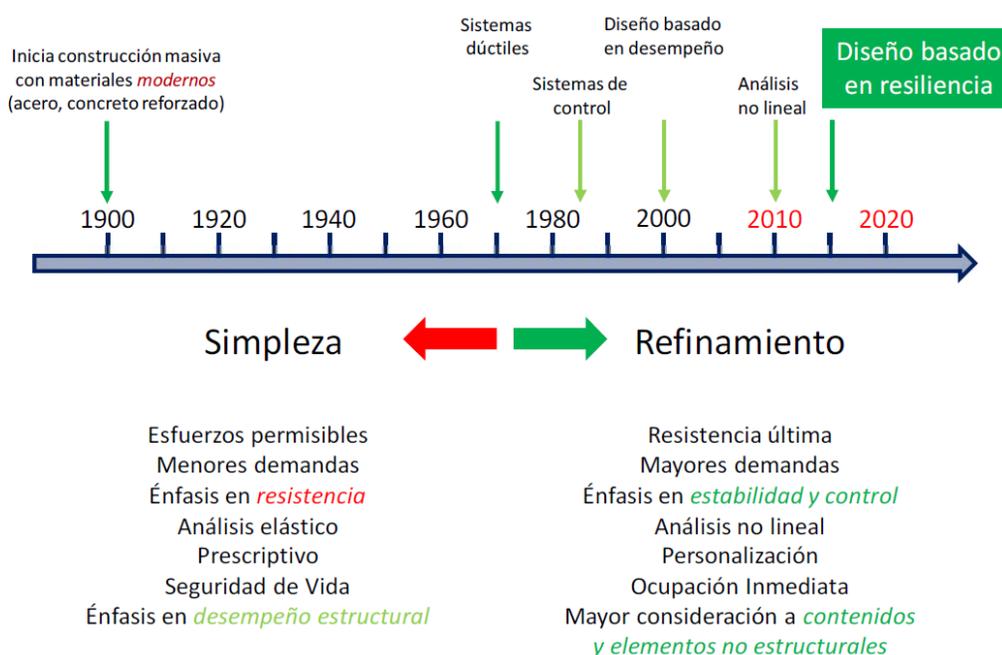


Fig. 3.4 Línea del tiempo sobre la evolución del análisis estructural. En función al reglamento de construcciones para el Distrito Federal 2023. Nota. (Terán, comunicación personal, 15 de noviembre 2022).

En el año 2023, el reglamento actualiza sus normas técnicas de diseño por sismo en puntos que pueden favorecer o alejar aún más al arquitecto del conocimiento estructural.

³¹ Gutiérrez, Juan, Ayala Gustavo (2022). Análisis de la resiliencia sísmica de edificios. <https://doi.org/10.18867/ris.107.603>

³² Doctor Amador Terán Gilmore, El Dr. Amador Terán Gilmore es ingeniero civil por la UAM Azcapotzalco y Doctor en Estructuras por la Universidad de California en Berkeley. Pertenece al Comité de Normas Técnicas complementarias de diseño por sismo y al SNI nivel II.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

“En el ámbito del diseño sismorresistente, los conceptos y el sentido común son tan importantes como las herramientas numéricas”³³.

En este nuevo reglamento RDFC 2023 y sus NTC, se plantea que el edificio esté compuesto por dos sistemas estructurales ver fig. 3.5. Cabe resaltar que esta propuesta de descomponer los sistemas de un edificio fue propuesta por Heino Engel desde 1967 en su clasificación de sistemas de Altura Activa (AA).

- 1.- El sistema que resista cargas verticales, por gravedad. Marcos resistentes a momentos flexibles.
- 2.- El sistema que resista las cargas horizontales, por sismo y viento. Dispositivos de control.

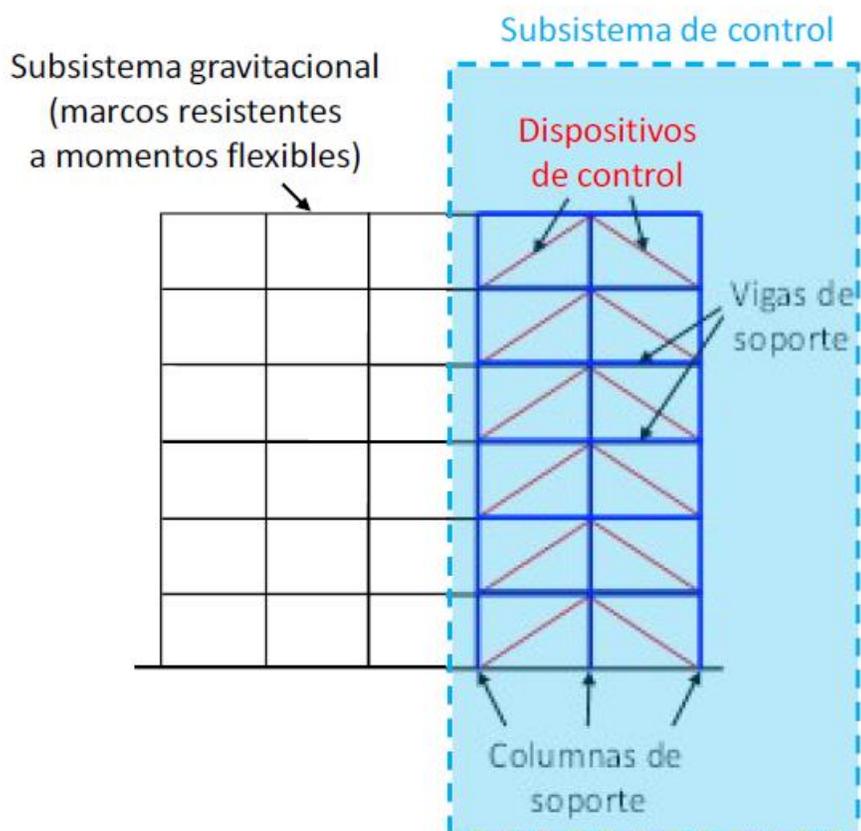


Fig. 3.5 Diagrama de dos sistemas de los edificios, por gravedad y por sismo. Imagen propia

³³ Cita del Dr. Amador Terán.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Esta diferenciación entre estos dos sistemas, por gravedad (sistema de marcos) y por sismo (sistema de contravientos y sistemas de control), permitirá al arquitecto replantearse la concepción de la forma arquitectónica a partir del sistema estructural. Entender el concepto y el sentido común de cómo trabajan las estructuras.

Inevitablemente cada vez más, veremos este paisaje urbano de fachadas contra venteadas, debido a este replanteamiento de la ingeniería estructural, ver Fig. 3.6



Fig. 3.6 Edificio eje central esq. Doctor Pascua, Col Doctores. Fotografía tomada por Norma González en el año 2022.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Continuando con el sistema de las diagonales en el diseño sísmico, se proponen como el primer mecanismo de defensa de la estructura, y que al desconectarse o fallar las diagonales, a manera de fusibles, es el pórtico con conexiones rígidas el segundo mecanismo de defensa.

Ahora bien, no siempre el aplicar las fórmulas y procedimientos de las normas, al pie de la letra, resulta en una estructura sismorresistente, si no se cuidan algunos factores que pueden hacer que la resistencia, ductilidad y estabilidad de las edificaciones disminuyan drásticamente sobre todo en sismos de larga duración.

En palabras del Dr. Agustín Hernández³⁴: “Desde el punto de vista de la estabilidad estructural, podemos reflexionar que la realidad suele imponer retos difíciles de calcular y, ante proyectos de mucha exigencia, las teorías analíticas solo son efectivas para orientar de manera paulatina un conjunto de procesos que deben ser concebidos y analizados como un todo”.

Factores y procesos que se tienen que tomar en cuenta:

- 1.- Concepción arquitectónica irregular que ocasiona torsiones excesivas, cambios bruscos de rigidez de un entrepiso a otro, formas de vibrar incompatibles de las diferentes partes que componen una edificación irregular en planta, etc. (formas muy irregulares).
- 2.- Fallas prematuras de tipo frágil, por corte o pandeo.
- 3.- Demandas excesivas de ductilidad en secciones o elementos críticos.
- 4.- Conexiones y otros detalles mal concebidos o ejecutados.
- 5.- Efectos de inestabilidad P-DELTA, que incrementa por la pérdida de rigidez gradual de la edificación.
- 6.- Fabricación y montaje defectuoso. Supervisión deficiente.
- 7.- Resonancia por coincidencia entre las características del terremoto y las formas de vibrar del terreno y la edificación.
- 8.- Cambios de uso o modificaciones a la estructura, por ejemplo, eliminación o modificación de los elementos no estructurales, cargas mayores que las del proyecto, etc.

³⁴Hernández, Agustín (2021). Diseño y construcción de apuntalamiento innovador para la cúpula del santuario de Nuestra Señora de los Ángeles. <https://doi.org/10.22201/fa.2007252Xp.2021.23.80167>

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

9.- Deterioro progresivo del sistema estructural debido a la intemperie, temblores, asentamientos diferenciales de las fundaciones, etc.

Si se observa el punto uno, cada vez más la tendencia del diseño arquitectónico son las formas irregulares, aunque el diseño sísmico nos ha enseñado por décadas que las formas regulares son las más resistentes ante cargas horizontales. La ingeniería sísmica en un intento por solucionar este requisito de irregularidad pasó de un diseño simple a uno complejo y que, además, no garantiza al 100% la seguridad del edificio.

Es común encontrar que el arquitecto requiere pre dimensionar sus proyectos, pero, mientras más se acerque a una forma irregular, menos posible será que puedan hacer un pre-dimensionamiento oportuno.

Ante tal circunstancia, la pregunta de ¿Cuál es el pre-dimensionamiento más adecuado?, deberá cambiar a, ¿Cuál es el sistema estructural más adecuado? Esta pregunta, le da al arquitecto más herramientas y control sobre su proyecto.

Frecuentemente el doctor Amador Terán responde a la pregunta del pre-dimensionamiento: “modelemos la estructura y dejemos que las matemáticas nos digan de qué tamaño son los elementos estructurales”. Lo que quiere decir es que es imposible hacer pre-dimensionamientos con estructuras irregulares y complejas porque se requiere modelar en un software que nos diga si es viable o no el modelo propuesto.

Estudiando los sistemas estructurales, sus características y transmisión de fuerzas, se podrá contestar a la pregunta: ¿Cuál sistema estructural es viable para hacer posible la intención arquitectónica?

Ahí el arquitecto, podrá decidir, cómo se pueden incluir los dos sistemas estructurales (sistema gravitacional y sistema de control) en su diseño y tener decisión sobre el paisaje urbano y su composición arquitectónica. De otra manera, la ingeniería sísmica registrará el diseño urbano, amparados en el reglamento.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Conclusión del capítulo 3.

El correcto planteamiento estructural en el tiempo adecuado promueve que el diseño arquitectónico incorpore opciones viables de materialización.

Es posible plantear una arquitectura que, de soluciones específicas para la Ciudad de México, si se logran identificar las diferentes alternativas de solución a la problemática de diseño sísmico y al mismo tiempo el diseño arquitectónico se orienta a la solución conceptual que reúna tanto cualidades espaciales exteriores como cualidades espaciales interiores.

Una de las causas en el refinamiento en los métodos de cálculo es la irregularidad de las construcciones. Mientras más irregulares sean las formas arquitectónicas y su estructura, más difícil de predecir su comportamiento, por lo que los métodos de cálculo se irán complicando, alejándose de la simpleza, sin garantizar completamente su adecuado comportamiento ante eventos de la naturaleza.

Capítulo 4
La composición arquitectónica desde los
sistemas estructurales.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Este capítulo plantea una teoría que permite abordar la conceptualización del proyecto arquitectónico desde las estructuras arquitectónicas.

4.1 El Proceso de Diseño del objeto arquitectónico.

Las palabras diseño arquitectónico, concepto arquitectónico, composición y programa arquitectónico, entre otros, se mezclan en las teorías y proyectos arquitectónicos.

Se puede identificar que los alumnos y docentes usan estas palabras indistintamente y se inclinan más en favor de usar una u otra dependiendo de la escuela de formación.

De acuerdo con la teoría de la arquitectura de la doctora Dulce María Barrios³⁵, se define el diseño arquitectónico como un proceso intelectual con conceptos y operaciones mentales propias que pueden ser aprendidas y, por lo tanto, deben formar parte de los contenidos pragmáticos de las asignaturas en que se decida dividir la materia de diseño arquitectónico, la aprehensión de la teoría del diseño permitirá al profesionista y al alumno mejorar su desempeño.

Por lo tanto, se puede aprender a diseñar desde cualquier nuevo concepto.

El diseño arquitectónico se considera como el quehacer sustantivo de los arquitectos, en donde la habitabilidad y el ser humano son el eje del diseño. Se considera que la habitabilidad es la condición del espacio que resuelve cada uno de los requerimientos humanos para el mejor desempeño de actividades establecidas. Es decir, para que un espacio sea realmente habitable es necesario que satisfaga cada uno de los requerimientos que provienen de la compleja naturaleza humana, desde los más concretos como los biológicos, hasta los más abstractos como los estéticos y los éticos y siempre con base a la naturaleza del problema específico de diseño que lo origina.

La composición arquitectónica, por el contrario, se usaba en las escuelas de arquitectura de los años 1950's en México, para componer un proyecto desde el estudio de los edificios que se consideraban clásicos en aquella época, se tomaban piezas y elementos de un edificio y se colocaban en este nuevo proyecto, en donde la suma de varios elementos hacía la composición arquitectónica. Este término de acuerdo con la Dra. Dulce María Barrios no es de uso común en la actualidad, pero se sigue usando en algunas escuelas de arquitectura. En este trabajo se ocupa la palabra composición para definir la

³⁵ Barrios, Dulce (2003-2004). Teoría del Diseño. Apuntes del curso impartido por la Dra. Dulce Ma Barrios en el posgrado de Arquitectura de la UNAM.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

intencionalidad del proyecto arquitectónico desde la clasificación de los sistemas estructurales.

Para abordar la metodología desde la teoría del diseño arquitectónico, se estudió la tesis doctoral "*Didáctica de la arquitectura: la enseñanza individualizada de la proyectación arquitectónica*" de Romeu Casajuana, Adoración³⁶, debido a que estuvo asesorada por Antonio Turati Villaran, que plantea la siguiente teoría del proyecto arquitectónico:

- Exploración del problema.
- Representación del problema.
- Problemática.
- Caso.
- Homólogos.
- Significación del problema y de la solución.
- Conceptualización arquitectónica.
- Proyecto.

Este trabajo no tiene la intención de realizar una teoría del diseño arquitectónico, sino tomar una teoría del diseño e incorporar la Metodología de Observación del Objeto (MOO) de las Estructuras Arquitectónicas.

Por lo que se optó tomar como base de la metodología MOOA de las estructuras arquitectónicas la Teoría de Enrico Tedeschi porque permite identificar detalladamente los campos en donde puede ser incorporada la metodología MOOA.

En la Teoría de la arquitectura de Enrico Tedeschi³⁷ se resaltan tres campos que satisfacen el concepto de habitabilidad anteriormente mencionado: Naturaleza, Sociedad y Arte.

Enrico Tedeschi es un arquitecto e investigador italiano que ha desarrollado una teoría sobre la arquitectura que se centra en la relación entre la forma arquitectónica y el contexto urbano y social en el que se inserta. Esta teoría se basa en la idea de que la arquitectura no es un objeto aislado, sino que está en constante diálogo con su entorno.

Según Tedeschi, el planteamiento arquitectónico debe ser integral y considerar no solo las necesidades funcionales del edificio, sino también su relación con el contexto histórico, cultural y social en el que se encuentra. En su libro "Arquitectura y Contexto", Tedeschi

³⁶ Romeu, Adoración. (2002). *Didáctica de la arquitectura: la enseñanza individualizada de la proyectación arquitectónica*

³⁷ Tedeschi Enrico (1969). *Teoría de la arquitectura*. Ediciones Nueva Visión. Buenos Aires. 2ª edición septiembre.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

propone un enfoque interdisciplinario para la arquitectura, que involucra no solo a arquitectos, sino también a sociólogos, antropólogos y otros expertos.

El planteamiento de Tedeschi busca crear edificios que no solo sean estéticamente atractivos, sino que también sean relevantes y sostenibles en su entorno. Para lograr esto, es necesario comprender y evaluar cuidadosamente los factores contextuales que influyen en el diseño de un edificio, incluyendo la cultura, la historia, el clima, la geografía, las necesidades sociales y económicas de la comunidad en la que se encuentra.

Esta teoría formula una metodología que enfoca los aspectos cambiantes de la arquitectura, plantea el desarrollo de los siguientes tres apartados para un buen planteamiento del problema y como consecuencia desarrollar un proyecto arquitectónico habitable.

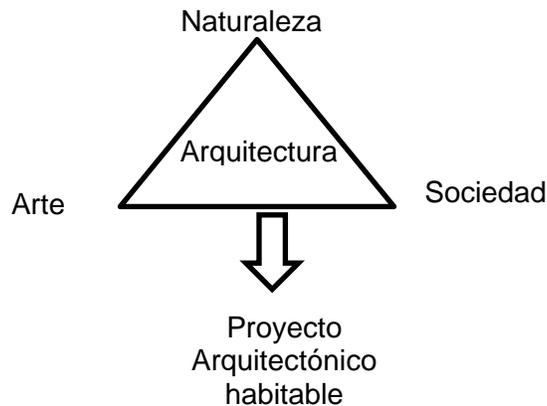


Fig. 4.1 Planteamiento de Enrico Tedeschi. Imagen propia

El planteamiento de Enrico Tedeschi Fig. 4.1.

- La naturaleza.
- La sociedad.
- El arte.

La naturaleza contempla:

- El paisaje natural
- El terreno
- La vegetación
- El clima.

La sociedad contempla:

- El uso físico.
- El uso psicológico.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

- El uso social.
- El paisaje cultural.
- La técnica y la economía.

El arte contempla:

- La forma.
- La plástica.
- Espacio.
- El gusto y la personalidad.

Se acota que no solo Tedeschi en 1969, ya intuía en su propuesta teórica la incorporación de la técnica, la forma, la plástica, el “espacio” sino que diversos teóricos como Vitruvio, en el año 40 DC, hace 2,000 años, también lo establecían como parte fundamental de un proyecto arquitectónico viable, ver fig. 4.2

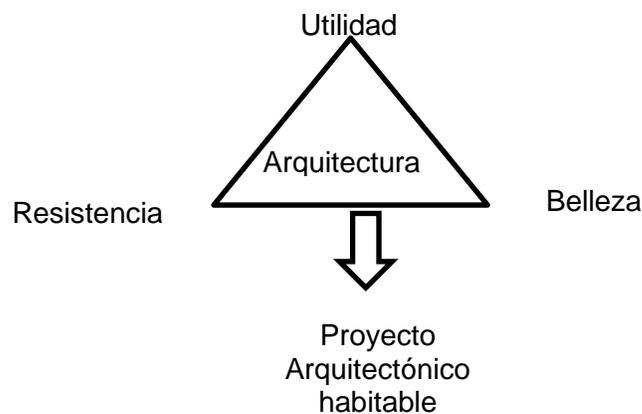


Fig. 4.2. Planteamiento de Vitruvio año 40 DC. Imagen propia

Se observa que en muchos edificios – sobre todo en los que albergan oficinas de planta libre- es muy probable que, dentro de una misma envolvente constructiva, surjan cualidades espaciales diferentes al variar los esquemas estructurales interiores, siendo todos ellos viables desde la perspectiva de la ingeniería estructural. Por ejemplo, en el sistema de pórtico, el sistema estructural elegido dará solidez y seguridad al edificio, inclusive su forma externa no cambiará, sin embargo, su cualidad espacial interior variará debido al sistema estructural elegido.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Un ejemplo es el uso de las columnas en dos edificios con tipologías diversas, el museo Soumaya en la ciudad de México (1994) Fig. 4.3, y la Mezquita de Córdoba en España (786), Fig. 4.4



Fig. 4.3 Museo Soumaya Ciudad de México. Foto tomada de internet

<https://fundacioncarlosslim.org/museo-soumaya-cumple-25-anos/#:~:text=Un%208%20de%20diciembre%20de,Slim%20Hel%C3%BA%20y%20la%20Sra.>



Fig. 4.4 Nombre. Mezquita-catedral de Córdoba.

Autor. Hernán Ruiz (et. al). Año. Siglos VIII al XVIII. Foto tomada de internet.
<https://www.expansion.com/fueradeserie/arquitectura/2017/08/02/597efc2fe5fdeac92a8b4575.html>

Las columnas son estructurales en ambos casos, sin embargo, en el caso del museo Soumaya, las columnas no aportan cualidades espaciales interiores, al contrario, impiden

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

la visual para apreciar la pintura atrás de la columna, mientras que, en la mezquita, las columnas organizan el espacio y tienen la intencionalidad de indicar el camino hacia la divinidad.

Se plantea en este método sobre las estructuras arquitectónicas que, en la fase preliminar del proyecto, se experimente sobre esquemas estructurales alternativos y su influencia sobre el espacio interior y exterior. El adecuado orden y momento en el que se haga este planteamiento preliminar conducirá a una adecuada selección del sistema estructural.

Esta fase preliminar queda entendida dentro de la teoría del diseño arquitectónico en la fase adecuada en tiempo y forma.

Dada la teoría de la arquitectura mencionada, queda esta propuesta referida a la Sociedad (técnica y economía) y Arte (Forma y espacio) dentro del significado de las definiciones principales.

Este es el momento en la parte del diseño en donde se infiere el sistema estructural, analizar cualitativamente los esfuerzos: comprensión, tracción, torsión, flexión y corte. Analizar el sistema estructural como opciones de diseño.

Esto se logra apoyándose en la clasificación de los sistemas estructurales de Engel y en la incorporación de conocimientos técnicos previamente adquiridos sobre las características de las estructuras arquitectónicas; se puede inferir una primera concepción base.

Derivado de la etapa anterior, se analizan, en una segunda etapa que los sistemas estructurales satisfagan las condiciones de forma, plástica y espacio. Y queda por el momento definida esta etapa.

Vale la pena mostrar que en la primera etapa de Naturaleza-Sociedad-Arte, quedan establecidas las pautas de la intención del proyecto arquitectónico; es decir, las intenciones que se buscan en la forma, plástica y espacio quedan establecidas en la siguiente tabla 4.5

Cualidades espaciales para lograr Intenciones interiores ³⁸ :	Cualidad escultórica, estructura rítmica, estructura interior, modulación espacial, acompasamiento ³⁹ rítmico, espectacularidad, irregularidad, escala, jerarquía espacial, ordenación del espacio
--	---

³⁸ D. A. Dondis. La sintaxis de la imagen. Introducción al alfabeto visual. Ed GG. 1ª edición 19ª tirada 2007.

³⁹ Acompasar. Acción y efecto de acompasar (|| hacer que dos objetos o acciones se correspondan).

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

	interior y exterior, invisibilidad, funcionalidad, ortogonalidad, profusión ⁴⁰ , densidad.
Cualidades espaciales para lograr Intenciones exteriores	Geometría clara, visibilidad, volumen, modulación, irregularidad, dureza visual, ligereza visual, frecuencia, forma orgánica, armonía, escala, simbolismo, representación de un objeto físico (árbol, grúa, etc.)

Tabla 4.5 Cualidades espaciales interiores y exteriores.

⁴⁰ Profusión. abundancia excesiva, superfluidad.

4.2 Conceptos de Didáctica.

Para aplicar una metodología, es necesario entender algunos conceptos previos.

De acuerdo con la tesis del Dr. Jesús Aguirre Cárdenas⁴¹, define que;

“La didáctica es la ciencia que, formando parte de la pedagogía, estudia los problemas de la enseñanza”.

En este caso, es un problema que se plantea a nivel universitario y exclusivamente para estudiantes de la carrera de arquitectura, ya que se está realizando el estudio sobre la enseñanza de los sistemas estructurales para la composición arquitectónica durante la formación de los arquitectos, por lo que, no se trata de todos los problemas de la enseñanza, sino concretamente es el caso de una didáctica aplicada a la enseñanza de un tema específico: La interpretación de la composición arquitectónica desde la clasificación de los sistemas estructurales, para estudiantes de arquitectura a través de docentes con el conocimiento necesario.

La didáctica se divide en dos partes: el Análisis Didáctico y la Metodología didáctica.

Análisis didáctico. Con base en el Modelo del triángulo didáctico⁴², se define como un modelo pedagógico que tiene sus raíces a finales del siglo XIX, y se centra en tres componentes: el alumno, el profesor y el conocimiento, y que se compone por dos tipos de variables: Independientes y dependientes.

El triángulo didáctico lo expone Passmore (1983) como: a) el sujeto que enseña, b) algo que enseña y c) alguien a quien enseña. Fig. 4.6

“Toda enseñanza está centrada en el alumno en el sentido de que no es su propósito único el exponer una materia, sino ayudar a que alguien aprenda algo; no importa qué virtudes lógicas tenga como exposición, fracasará como enseñanza si no da como resultado tal efecto. Pero, al mismo tiempo, el maestro está intentando enseñar a los alumnos algo, y ese algo de ninguna manera carece de importancia: tal vez se trate, como en el caso de Fagin, de enseñar a robar carteras o, como en el de Sócrates, de enseñar a pensar de modo crítico. Tiene que enseñar por igual a los alumnos y una materia” (Passmore. 1983).⁴³

⁴¹ Aguirre, Jesús (2011). Método de fines y conceptos en la enseñanza de la resistencia de materiales para arquitectos. Posgrado de Arquitectura UNAM.

⁴² Modelo del Triángulo didáctico. Es un modelo pedagógico que tiene sus raíces a finales del siglo XIX, y que se centra en tres componentes: el alumno, el profesor y el conocimiento.

⁴³ (Passmore, 1983:37)

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

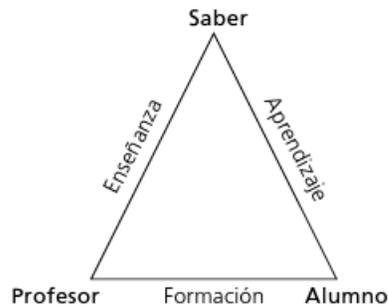


Fig. 4.6 Triángulo pedagógico, tomado de Jean Houssaye⁴⁴. Imagen propia

Sin embargo, en estudios⁴⁵ recientes se discute la pertinencia del triángulo pedagógico como una aproximación teórica para describir e implementar la enseñanza o la práctica educativa, por lo que han surgido modelos alternativos al triángulo pedagógico uno de ellos son las interacciones didácticas. Este comparativo es importante abordarlo porque actualmente en las capacitaciones a los docentes de la Facultad de Arquitectura de la UNAM en formación didáctica, se aborda el proceso de enseñanza aprendizaje de acuerdo con el triángulo pedagógico, sin embargo, en otras Instituciones a nivel Nacional en México 2023 (ITESM Modelo TEC21), se imparte el modelo por competencias, que se refiere al modelo basado en interacciones didácticas Fig. 4.7.

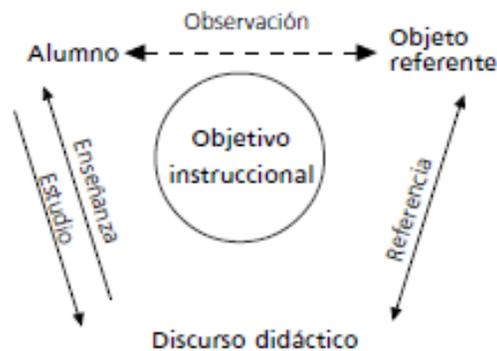


Fig. 4.7 Esquema del modelo de interacciones didácticas.

Imagen adaptada de Ibañez Carlos.

⁴⁴ Ibañez Carlos (2007). Un análisis crítico del modelo del triángulo pedagógico. www.scielo.org.mx

⁴⁵ Ídem

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Sergio Tobón⁴⁶ realiza una definición la cual se ajusta a las particularidades de esta investigación. Tobón asevera que “El énfasis de la enseñanza está en la regulación que el docente realiza con el fin de formar determinadas competencias en sus estudiantes y, al mismo tiempo, construir y afianzar sus propias competencias, teniendo como guía la formación humana integral y el entretrejo del saber mediante la reflexión sobre su proceder” (Tobón, 2013).

Esta definición de Tobón permite identificar una doble función de la enseñanza: la transformación de quien enseña y quien aprende. Desde esta perspectiva, la enseñanza no se reduce al acto de impartir conocimientos; al contrario, se refiere a un proceso en el cual docente y estudiantes intercambian saberes y van descubriendo nuevas oportunidades de aprendizaje. (Tobón, 2013).

Desde esta perspectiva, el proceso de enseñanza-aprendizaje ha dejado de entenderse como un mero acto de transmisión de un lado hacia otro para definirse, más bien, como una comunicación especializada que supone el diálogo y la construcción conjunta⁴⁷.

Por lo tanto; el profesor debe:

- A) Primero conocer o saber aquello que va a enseñar. Conocer el objeto.
- B) Segundo, Mediar. Su papel fundamental es lograr enseñar al alumno lo que conoce o sabe y lo hace mediando al alumno formas o modos de actuar ante los objetos, que, en caso de cumplir determinados criterios morfológicos y funcionales de logro, se validan como conocimiento.
- C) Tercero, crear un discurso didáctico. La Mediación ante objetos o situaciones las realiza el profesor mediante el lenguaje, realizando una disertación estructurada en condiciones propicias. En la actualidad una interacción didáctica no requiere en forma indispensable la presencia del profesor en persona, pues en su lugar puede ocuparlo un libro, una grabación, una computadora, etc., desde esta perspectiva, el

⁴⁶ Tobón, Sergio (2013) Formación integral y competencias. Pensamiento complejo, currículo, didáctica y evaluación (Bogotá: Ecoe Ediciones), 285.

⁴⁷ Villalta, Páucar, et al. (2009). Modelos de estudio de la interacción didáctica en la sala de clase. Investigación y Postgrado, 24(2),61-76. [fecha de Consulta 8 de junio de 2023]. ISSN: 1316-0087. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=65817287004>

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

factor fundamental que en la interacción didáctica no es el profesor el que interactúa, sino el discurso didáctico.

En el modelo de interacciones se proponen como principales factores de los procesos educativos, el alumno, el discurso didáctico y el mundo real. En donde el aprendizaje se representa como una modificación en la interacción del alumno con el mundo real, hacia un *desempeño convencional llamado competencia (Tobón, 2013)* en donde el aprendizaje se concibe como una modificación del desempeño individual ante situaciones concretas y no como adquisición del conocimiento, esto es, una disposición a hacer y decir ante las situaciones concretas del mundo real de acuerdo con los criterios convencionales definidos. Por otro lado, se presenta al profesor como factor fundamental al discurso didáctico para el análisis de los procesos educativos como una condición necesaria que define los procesos educativos esencialmente humanos.

Como conclusión: Mediar conocimientos es desarrollar en otro individuo competencias, disposiciones para conducirse frente a situaciones concretas cumpliendo criterios de acierto. Las interacciones didácticas explican el desarrollo o no, de las competencias objetivo (objetivo instruccional) del estudiante. El alumno es en términos formales, el individuo que debe desarrollar las competencias propuestas y descritas en el objetivo instruccional, a partir de su interacción con el objeto (Mundo real) y el discurso didáctico.

4.3 Metodología MOOA para las estructuras arquitectónicas.

El Modelo de la metodología de las estructuras arquitectónicas se basa en la observación del objeto y su interacción con él, por lo que lleva por nombre MOOA (Método de Observación del Objeto y su inter-Acción)

La metodología didáctica es el conjunto de estrategias, procedimientos y acciones organizadas y planificadas por los docentes con el fin de desarrollar las competencias de su alumnado.

Actualmente hay varias metodologías que ayudan al profesor a acercar el conocimiento al alumno y a desarrollar competencias (Toma de decisiones, capacidad de análisis, trabajo en equipo, habilidades de pensamiento, interpretación de datos, capacidad de comunicación).

- Aprendizaje basado en proyectos (ABP)
- Aprendizaje o aula invertidos (Flipped Classroom)
- Aprendizaje colaborativo.
- Gamificación
- Aprendizaje basado en problemas.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

- Pensamiento de diseño (Design Thinking)

Este proceso interactivo del proceso de enseñanza aprendizaje, no puede pensarse como un paso automático, es decir, que el docente exponga un tema a su clase y que los alumnos escuchen verdaderamente y aprendan. Se tienen que desarrollar competencias a través de diferentes metodologías.

El Dr. Jesús Aguirre dice: “el profesor que consigue hacer pensar a sus alumnos tiene el secreto de la enseñanza”, adelantado a su época, el Doctor Aguirre se refería a desarrollar en los alumnos la competencia de la habilidad del pensamiento. Hacerles pensar.

En este trabajo se plantea que una competencia que se tiene que desarrollar en los alumnos que estudian estructuras en la carrera de arquitectura es que apliquen criterios estructurales en la solución del proyecto desde la composición arquitectónica de manera estratégica y creativa.

Las estructuras son un tema de poco gusto entre la mayoría de los estudiantes, por lo que desarrollar esta competencia, permite que el alumno no sólo calcule en las materias de estructuras, sino que, además, desarrolle criterios estructurales que le permitan plantear sus proyectos arquitectónicos y solucionarlos con una estrategia creativa debidamente planeada, que es un objetivo que los alumnos reciben con mucho gusto e interés a manera de juego lógico.

En función de la experiencia docente, la metodología MOOA es el orden que se propone para que el proceso de diseño conduzca a crear estructuras arquitectónicas y que tiene la cualidad de crear proyectos integrales entre la estructura y el objeto del diseño arquitectónico, apoyándose en las interacciones didácticas, la clasificación de Heino Engel y la teoría de Enrico Tedeshi. fig. 4.8

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

METODOLOGÍA (MOAA)

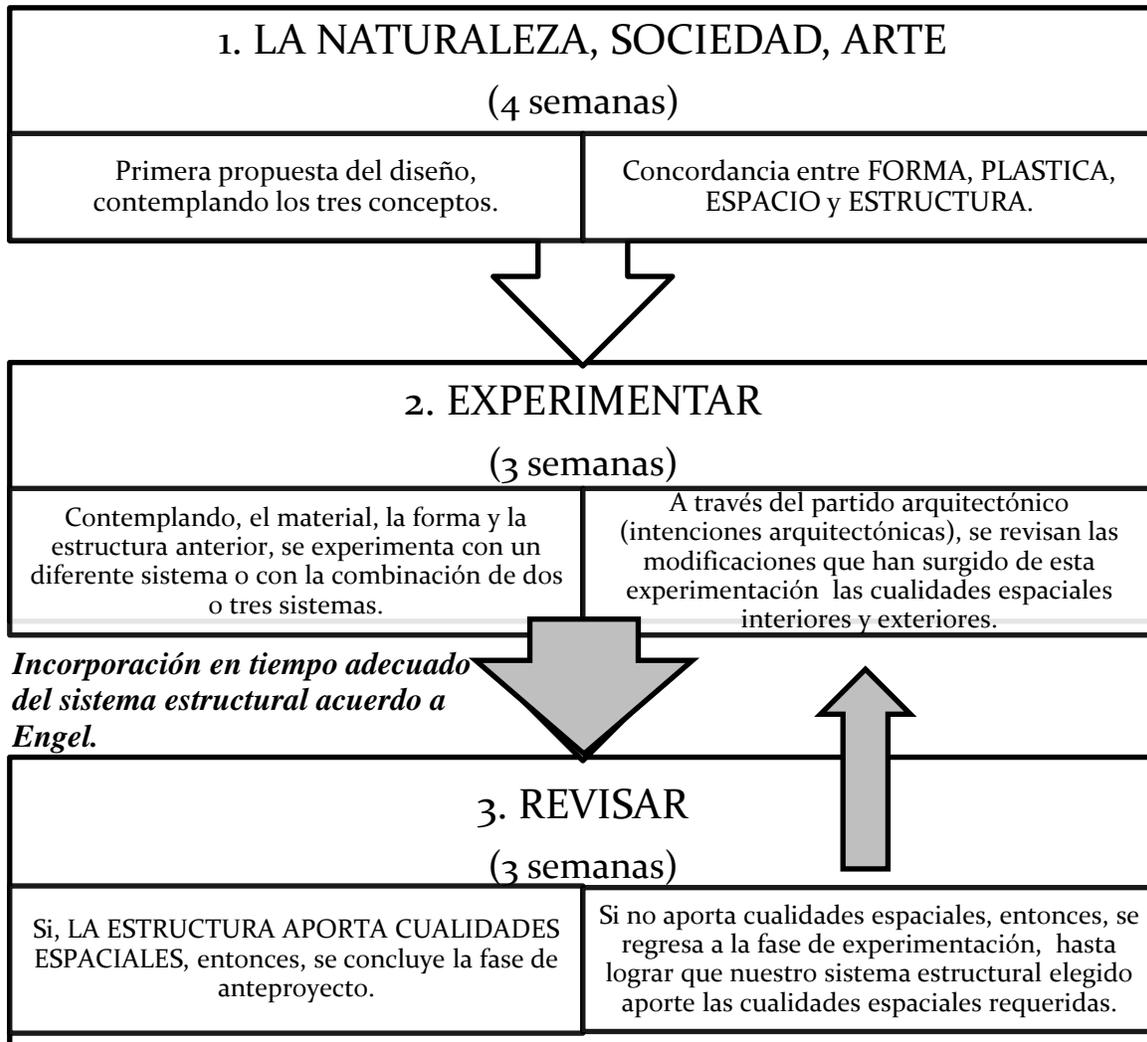


Fig. 4.8 Diagrama sobre la metodología MOOA. Imagen propia.

Para lograr la elección e incorporación en el tiempo adecuado del sistema estructural, y para que otorgue cualidades espaciales al proyecto arquitectónico, se propone una tabla que describe la didáctica entre el docente y el alumno, una metodología que se ha ido afinando a lo largo de varios cursos de sistemas estructurales impartidos a nivel licenciatura en la carrera de arquitectura. Ver fig. 4.9

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

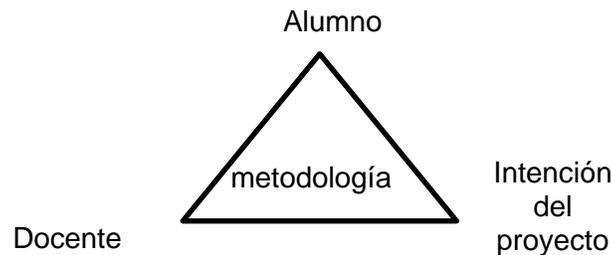


Fig. 4.9 Esquema para lograr la incorporación en el tiempo adecuado del sistema estructural. Imagen propia

Esta metodología tiene su fundamento en la metodología de ABP, aprendizaje basado en proyectos. El aprendizaje basado en proyectos constituye una metodología pedagógica innovadora, que emplea problemáticas complejas del mundo real como medio para facilitar la adquisición de conceptos y principios por parte de los estudiantes, en lugar de la transmisión directa de hechos y teorías.

Metodología MOOA para crear Estructuras Arquitectónicas.

Fase preliminar. Estudio del Contexto.

Antes de iniciar el proceso de selección del sistema estructural y del proceso de casos de estudio, el alumno define su intención arquitectónica, a través de su partido arquitectónico⁴⁸ de acuerdo con la teoría del diseño de Enrico Tadeshi que se describió anteriormente, después inician tres fases de la secuencia.

Una manera de generar la conceptualización es considerar la naturaleza, el arte y la sociedad, es decir, el emplazamiento, su contexto y la zonificación. Después, volcar la

⁴⁸ Partido arquitectónico. El Partido arquitectónico se establece a partir del análisis de los requerimientos y las restricciones del proyecto, así como de los objetivos y la visión del cliente. Es el punto de partida que define la dirección y el enfoque que se tomará en el diseño.

El partido arquitectónico puede estar basado en diferentes aspectos, como la funcionalidad, la estética, la sostenibilidad, la interacción con el entorno o la respuesta a necesidades específicas del programa. Por ejemplo, un partido arquitectónico puede ser la creación de un espacio abierto y fluido que fomente la interacción social, o la incorporación de elementos naturales y sostenibles en el diseño.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

investigación previa y el bagaje (cultural, artístico, etc.) del alumno arquitecto en una línea que representa un concepto, respecto del emplazamiento. Ver fig. 4.10

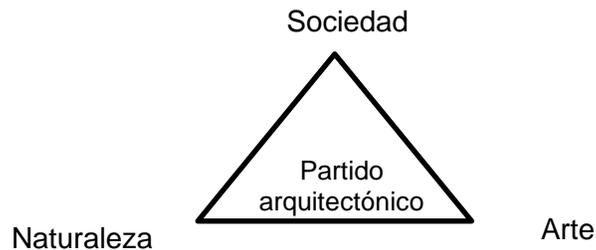


Fig. 4.10 Esquema para lograr el partido arquitectónico. Imagen propia

Se realiza paralelamente al emplazamiento, un croquis que establece argumentos que representan este bagaje, se representan principios de cualidades espaciales interiores y exteriores. Esto genera un concepto o una intención arquitectónica.

Ver ejemplo en Anexo 1.

Primera fase. Estudio de Casos Homólogos.

Después de haber definido las intenciones arquitectónicas, los alumnos están preparados para investigar acerca de los sistemas estructurales. Después debe elegir un edificio referente o análogo, que muestre el sistema estructural para lograr analizarlo cualitativamente. Esta fase, permite al alumno observar la expresión de diversos componentes arquitectónicos y estructurales simultáneamente, con el fin de realizar una descripción con orden acorde con la taxonomía propuesta de Heino Engel.

Se considera cuál de todos los sistemas estructurales constituye un componente de la edificación capaz de hacer posible la transmisión de fuerzas de acuerdo con la caracterización que describe Heino Engel.

Se acotan los esfuerzos (tracción, compresión, torsión, flexión, fuerzas horizontales, etc.) a los que será sometido. Ver fig. 4.11

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

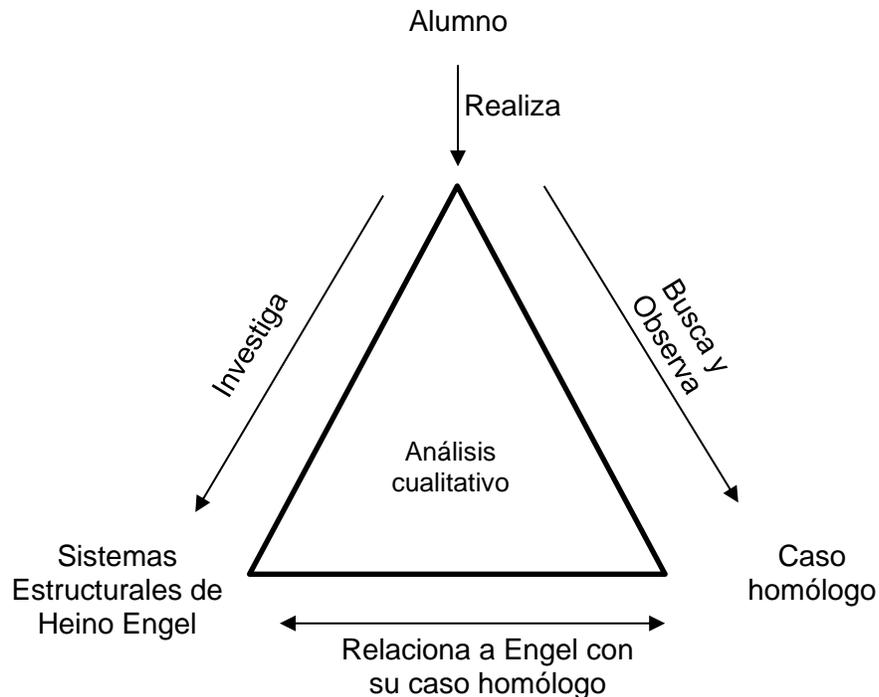


Fig. 4.11 Esquema que muestra cómo se realiza el análisis cualitativo con base en el estudio de casos homólogos. Imagen propia

Segunda fase. Experimentación. Reinterpretación del sistema estructural.

Al entender cómo funciona cada sistema estructural, el siguiente paso consiste en que el alumno comience a reinterpretar el sistema, para lograr proponer mediante una serie de esquemas, un proyecto arquitectónico con el sistema estructural que ya analizó y que entiende cómo funciona. En algunos casos varios alumnos logran reinterpretarlo, deconstruirlo, en otros casos solamente lo trasladan sin ninguna modificación. Esta fase pretende que el alumno experimente y compruebe que, ***dentro de una misma envolvente, puede descubrir cualidades espaciales diferentes al variar los esquemas estructurales, siendo todos ellos viables desde la perspectiva de la ingeniería estructural.*** Ver fig. 4.12

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

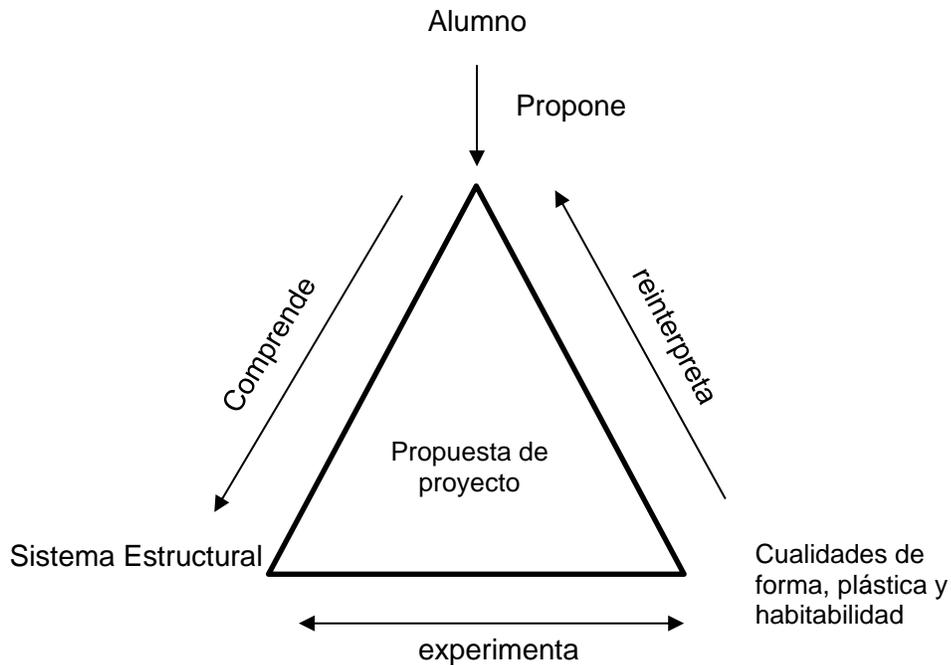


Fig. 4.12 Esquema donde se representa la secuencia para realizar la reinterpretación de los sistemas estructurales. Imagen propia

En esta fase,

- 1.- Se revisan las cualidades de forma, plástica y espacio definidas.
- 2.- Se experimenta con diferentes sistemas estructurales o con el mismo, pero con diferente tipología, por lo que tiene un mayor panorama para acercarse cada vez más a una condición de habitabilidad.
- 3.- Se revisa el material constructivo (concreto armado, madera, acero, etc.) del cual se dispone.
- 4.- Se comprueba cualitativamente si el sistema estructural, logra satisfacer la forma, espacio y plástica, si es así, se concluye la fase de experimentación.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Tercera fase. Propuesta de diseño, arquitectónico y estructural. Ver fig. 4.13

- Propuesta del proyecto arquitectónico visualizando las intenciones espaciales interiores y exteriores que el sistema estructural elegido permite.
- Se elabora una maqueta estructural (no arquitectónica), donde se identifique el sistema estructural y sus componentes.
- Finalmente, como punto opcional, se puede realizar el dimensionamiento de los elementos estructurales principales. Es importante destacar que, hasta este punto, el alumno no ha realizado cálculos para realizar la propuesta de una estructura arquitectónica.

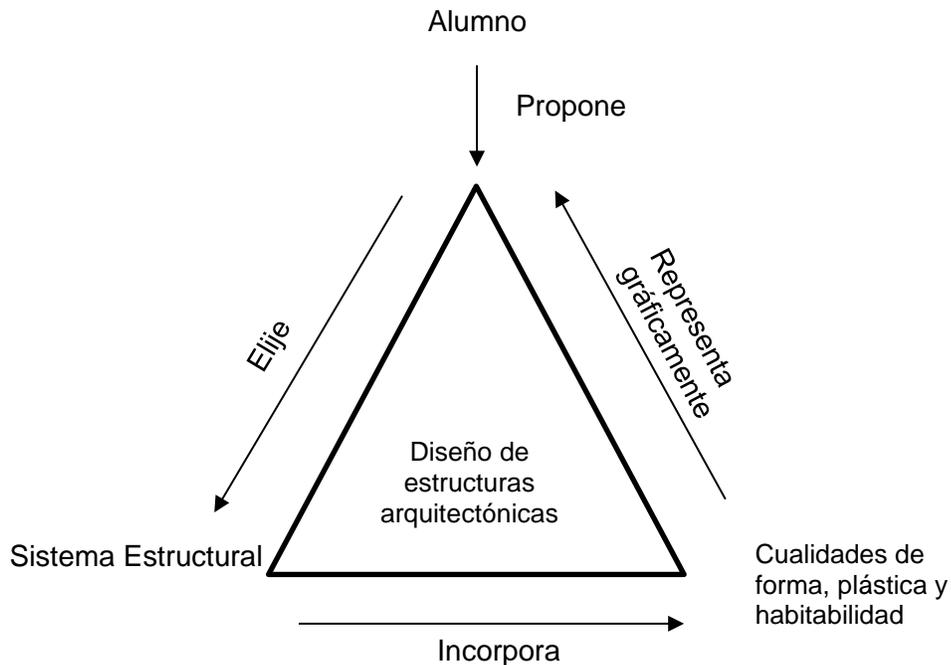


Fig. 4.13 Esquema que ilustra la propuesta para el diseño arquitectónico y estructural. Imagen propia

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

4.4 Secuencia de la Metodología MOOA.

Acciones implementadas por el profesor para que el alumno logre plantear la estructura arquitectónica, tomando como referencia el diagrama de interacciones didácticas.

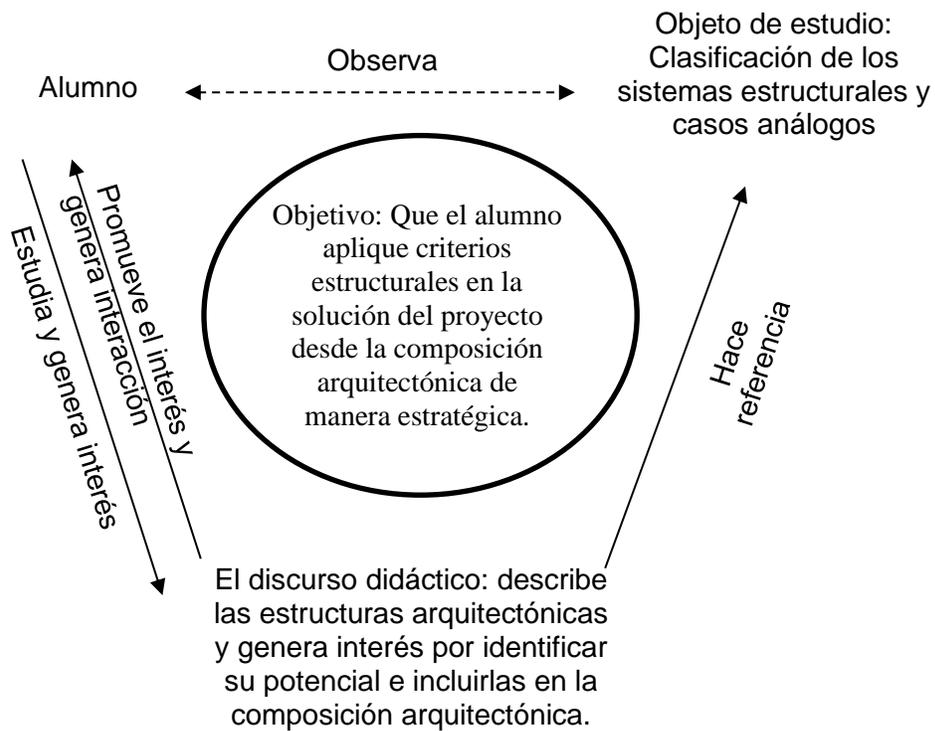


Fig. 4.14 Esquema donde se representa la interacción didáctica MOOA para lograr las estructuras arquitectónicas. Imagen propia

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

La secuencia metodológica **MOOA**, se propone con una organización de tres columnas, la primera contiene el tema, la segunda el discurso didáctico del profesor, la tercera contiene la respuesta del alumno ante la interacción con el objeto real.

Tema	Profesor	Alumno
<p>Naturaleza, Arte y Sociedad.</p> <p>Intención del diseño del objeto arquitectónico.</p>	<p>El profesor guía al alumno a definir su partido arquitectónico a través de la Teoría de Enrico Tedeschi, le ayuda a describir la cualidad espacial que quiere representar el alumno en su proyecto.</p> <p>En una primera etapa puede preguntar al alumno:</p> <p>¿Quiere priorizar cualidades espaciales interiores?</p> <p>Estructura rítmica o irregularidad, etc.</p> <p>O ¿cualidades espaciales exteriores?</p> <p>Volumen, modulación, dureza visual, etc.</p> <p>Ver tabla 4.1</p> <p>Ver anexo 1</p>	<p>Proyecta la carga cultural y de significados en un volumen o una línea que representa su intención arquitectónica.</p> <p>Realiza un partido arquitectónico, un diagrama de funcionamiento, una zonificación, análisis de áreas y programa arquitectónico, análisis de contexto urbano.</p> <p>Realiza una maqueta volumétrica.</p>
<p>Investigación de análogos.</p>	<p>Muestra la taxonomía de los sistemas estructurales y su funcionamiento.</p> <ul style="list-style-type: none"> • En una primera etapa es conveniente estudiar solo un sistema y sus 	<p>Investiga el funcionamiento de los sistemas estructurales que hacen posible la forma e intención arquitectónica de acuerdo con Heino Engel.</p> <p>Se acotan los esfuerzos (tracción, compresión, torsión,</p>

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

	<p>diferentes configuraciones.</p> <ul style="list-style-type: none"> • En una segunda etapa, involucrar dos o hasta tres sistemas. • Y en un nivel avanzado, se pueden estudiar todos los sistemas al mismo tiempo <p>Se muestran los diferentes análogos y su funcionamiento de acuerdo con la taxonomía de los sistemas estructurales. En una etapa inicial, es conveniente mostrar y explicar al menos 5 casos de estudio. Después de interiorizado el método, es suficiente mostrar dos análogos por sistema estructural.</p> <p>Le pide al alumno que revise análogos y los analice. El profesor sigue muy de cerca esta fase porque el alumno tiende a identificar incorrectamente todos los sistemas estructurales.</p>	<p>flexión, fuerzas horizontales, etc.) A los que será sometido.</p> <p>Investiga diferentes casos análogos que tienen un sistema similar o igual a los estudiados con Engel.</p> <p>Reflexiona junto con el profesor en el funcionamiento del sistema estructural.</p> <p>Identifica cada elemento estructural y sistema constructivo del caso Análogo.</p>
--	---	--

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

<p>Experimentación</p> <p>Reinterpretación del sistema estructural.</p>	<p>El alumno plantea los ejes principales de su proyecto con la información obtenida de los sistemas estudiados.</p> <p>El profesor invita al alumno para que reinterprete el sistema, de tal manera que otorgue las cualidades que se plantearon en un inicio. Esta es una fase muy complicada para el alumno, requiere de mucha creatividad y de haber comprendido profundamente el sistema analizado, por lo que el profesor debe retroalimentar al alumno constantemente con algunas preguntas.</p> <p>¿Es posible replantear los ejes para que otorguen una forma orgánica?</p> <p>¿Cómo afecta en las cualidades exteriores el elemento sismorresistente, es posible incorporarlo a la composición arquitectónica?</p> <p>¿La composición arquitectónica se enriquece o empobrece con el planteamiento del sistema estructural elegido?</p> <p>Si la composición arquitectónica deviene de un planteamiento sustentable</p> <p>¿El sistema estructural</p>	<p>Se revisan las cualidades de forma, plástica y espacio definidas.</p> <p>Se experimenta con diferentes sistemas estructurales para comprobar cuál es el que se acerca cada vez más a una condición de habitabilidad.</p> <p>Se revisa en segundo lugar el material constructivo (concreto armado, madera, acero, etc.) del cual se dispone.</p> <p>Se comprueba si: el sistema estructural último, logra satisfacer la forma, espacio y plástica, si es así, se concluye la fase preliminar.</p>
---	--	---

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

	<p>elegido, da la pauta para esa intención?</p>	
<p>Propuesta de diseño, arquitectónico y estructural.</p>	<p>De acuerdo con la fig. 3.4 Se plantea que el edificio esté compuesto por dos sistemas estructurales:</p> <p>1.- El sistema que resista cargas verticales, por gravedad. Marcos resistentes a momentos flexibles.</p> <p>2.- El sistema que resista las cargas horizontales, por sismo y viento. Dispositivos de control.</p> <p>Se realiza el cálculo para diseñar los elementos estructurales del sistema que resiste por cargas verticales. En zona sísmica, deberá incluir herramientas como los sistemas de control que le ayuden al alumno a dimensionar su estructura de forma correcta.</p> <p>En una primera etapa se deberá elegir el cálculo de un sistema. Por ejemplo, pórticos en concreto y/o en acero.</p> <p>Se podrá ir incluyendo diversos métodos de cálculos.</p>	<p>Termina la propuesta del proyecto arquitectónico con las intenciones espaciales interiores y exteriores que el sistema estructural elegido, permite.</p> <p>Elabora una maqueta estructural, identificando el sistema estructural y sus componentes.</p> <p>Continúa con el proyecto arquitectónico y finalmente el cálculo y diseño estructural de los elementos estructurales.</p>

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

	<p>En la etapa de diseño estructural, los conceptos y el sentido común son tan importantes como las herramientas numéricas. Se considera que, si el planteamiento es viable en su concepto (taxonomía de los sistemas estructurales) y sentido común (reinterpretación de los sistemas estructurales), el proyecto se puede considerar diseñado, aunque no tenga pre-dimensionamientos. Posteriormente los softwares, se encargarán de las dimensiones.</p>	
--	---	--

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

4.5 Rúbrica para evaluar las Estructuras Arquitectónicas. De acuerdo con la metodología MOOA.

Para la evaluación cualitativa y cuantitativa de esta metodología se aplica la siguiente rúbrica, con variaciones dependiendo del plan de estudio de la universidad en la que se aplicó. En este caso se muestra la rúbrica aplicada a alumnos de la materia de sistemas estructurales II de la Facultad de Arquitectura pública, ubicada en el 5º semestre del plan de estudios 2017.

RUBRICA para evaluar la elaboración de un proyecto arquitectónico a partir del conocimiento de los sistemas estructurales que lo hacen posible con la metodología MOAA				
Rubros / Características	Completo	En desarrollo	Insuficiente	Puntaje obtenido
<p>Competencia 1 Identificación de los elementos estructurales.</p> <p>Análisis del edificio Análogo.</p> <p>Distancia y medidas entre elementos identificados, materiales, etc.</p> <p>Clasificación según Heino Engel.</p>	<p>Incluye 100% de lo solicitado.</p> <p>Se identifican y señalan, las distancias entre ejes, las columnas, vigas primarias y secundarias, losas, acero, concreto, etc. Todos los elementos estructurales.</p>	<p>Incluye 50% información de calidad.</p>	<p>No presenta contenidos de calidad.</p>	
<p>Competencia 2. Describe las estructuras arquitectónicas y genera interés por identificar su potencial e incluirlas en la composición arquitectónica.</p> <p>Volumetría.</p>	<p>Incluye 100% de lo solicitado.</p> <p>Presenta una maqueta volumétrica y un plano de ejes estructurales, de</p>	<p>Incluye 50% información de calidad</p> <p>Presenta el modelo volumétrico físico o planteamiento de ejes</p>	<p>No presenta contenidos de calidad</p> <p>NO Presenta el modelo volumétrico físico o planteamiento de ejes</p>	

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

<p>Una vez que se tienen identificados los elementos estructurales, se elabora la volumetría del nuevo proyecto, reinterpretando el sistema analizado. Se realiza el planteamiento de ejes de acuerdo con el análogo estudiado.</p>	<p>de acuerdo con el análogo. Cotas, nomenclatura de ejes.</p>	<p>estructurales, de acuerdo con el análogo. No presenta planos.</p>	<p>estructurales, y de acuerdo al análogo.</p>	
<p>Competencia 3 El alumno es capaz de especificar el proyecto con claridad. Que el alumno aplique criterios estructurales en la solución del proyecto desde la composición arquitectónica de manera estratégica.</p> <p>Proyecto Arquitectónico. Documento escrito con una reflexión entre la relación forma estructural – forma arquitectónica específicamente de su proyecto. Presentación de planos arquitectónicos. Plantas, Cortes y fachadas del proyecto arquitectónico. Modelo 3D.</p>	<p>Incluye 100% de lo solicitado</p> <p>Reflexión de la relación entre estructura – forma arquitectónica.</p>	<p>Incluye 50% información de calidad</p> <p>No existe Reflexión de la relación entre estructura – forma arquitectónica.</p>	<p>No presenta contenidos de calidad</p> <p>No presenta la reflexión ni el proyecto arquitectónico.</p>	

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

<p>Competencia 4. Opcional. Realiza el cálculo para diseñar los elementos estructurales del sistema que resiste por cargas verticales. En zona sísmica, deberá incluir herramientas como los sistemas de control que le ayuden al alumno a dimensionar su estructura de forma correcta.</p> <p>Cálculo y diseño estructural de vigas y maqueta estructural. Planos estructurales. Bajada de cargas de acuerdo con los cortes por fachada. Cálculo de vigas y columnas. Maqueta estructural.</p>	<p>Incluye 100% de lo solicitado</p> <p>Presenta Bajada de cargas Planos estructurales Cálculo de vigas con ftool. Cálculo de columnas. Maqueta estructural</p>	<p>Presenta el 50% del contenido de este punto</p> <p>No presenta maqueta estructural o presenta cálculos incorrectos.</p>	<p>No presenta contenidos de calidad</p> <p>No presenta el cálculo ni el diseño de los elementos</p>	
<p>Total (puntos)</p>				

Con esta rúbrica se puede evaluar tanto cualitativamente como cuantitativamente las competencias adquiridas por el alumno al interactuar con un objeto real a través de aprendizaje basado en problemas.

Competencias desarrolladas por el alumno de acuerdo con la metodología MOOA.

Competencia 1.- Identifica los elementos estructurales y los clasifica de acuerdo con la taxonomía de Engel.

Competencia 2.- Describe las estructuras arquitectónicas y genera interés por identificar su potencial e incluirlas en la composición arquitectónica.

Competencia 3.- El alumno es capaz de aplicar criterios estructurales en la solución del proyecto desde la composición arquitectónica de manera estratégica.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Competencia 4.- Realiza el cálculo para diseñar los elementos estructurales del sistema que resiste por cargas verticales. Incluye los sistemas de control y rigidización que le ayuden a proponer una estructura sismo resistente.

4.6 Las estructuras arquitectónicas como creadora de espacios.

La interpretación de la composición arquitectónica desde los sistemas estructurales es una visión del poder transformador que tiene la estructura y que ofrece muchas más oportunidades al proyecto arquitectónico que limitaciones.

La incorporación de una sutil perspectiva estructural permite percatarse de una viabilidad constructiva de las intenciones arquitectónicas. Si bien las diferentes corrientes teóricas de la arquitectura en ocasiones no necesitan de esta intención constructiva, en términos constructivos si es necesario incorporar la representación de la estructura como creadora de espacios y observar cómo es que se alteran las superficies, los volúmenes y la habitabilidad.

A lo largo de este estudio se ha puesto énfasis en el aprendizaje de diferentes sistemas estructurales y su funcionamiento primario, es decir, de sus estados de esfuerzos internos y externos, para lograr así una comprensión más profunda sobre las libertades que se puedan lograr al iniciar un proyecto arquitectónico con una intención estructural predefinida. Se ha hecho énfasis en que, en la etapa adecuada en donde se propone a la estructuración es de suma importancia para lograr el correcto planteamiento del problema.

Estructurar un edificio al final del proyecto arquitectónico, una vez planteadas todas las soluciones proyectuales posibles, impacta de manera profunda al mismo proyecto, porque la incorporación del sistema estructural modificará de forma inmediata todas las soluciones preestablecidas, y a su vez el proyecto se modificará tanto en exterior como en la configuración interior.

Si se logra investigar sobre la implicación que tiene la estructura en los espacios interiores se elegirán de manera inmediata dos o tres sistemas alternos que satisfagan las diferentes necesidades de las intenciones espaciales interiores⁴⁹ como por ejemplo: Calidad escultórica, estructura rítmica, estructura interior, modulación espacial, acompasamiento⁵⁰ rítmico, espectacularidad, irregularidad, escala, jerarquía espacial, ordenación del espacio

⁴⁹ Dondis (2007), La sintaxis de la imagen. Introducción al alfabeto visual. GG Diseño. 1ª ed. 19ª tirada.

⁵⁰ Acompasar. Acción y efecto de acompasar (|| hacer que dos objetos o acciones se correspondan).

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

interior y exterior, invisibilidad, funcionalidad, ortogonalidad, profusión⁵¹, densidad, equilibrio.

Los resultados que se obtuvieron en cuanto al planteamiento y solución del problema estructural fueron favorables en el sentido mismo de la identificación de los sistemas estructurales, observarlos y tratar de imitarlos en una réplica a escala. Los mismos alumnos se enfrentaron a un problema de cambio de perspectiva, observar el objeto arquitectónico desde la estructura que da la forma, esto implica ya un cambio desde el observador (joven arquitecto), ver más allá de la forma arquitectónica y sus elementos estéticos.

Los comentarios de los alumnos de arquitectura al terminar un proyecto elaborado con la metodología MOOA de las estructuras arquitectónicas, invitan a seguir investigando más en esta propuesta.

“Después de elaborar este proyecto, me di cuenta de que identificar y diseñar los elementos estructurales de todos nuestros proyectos es algo de suma importancia. Esto es debido a que enfocarnos en este criterio me permite estar seguro de que el proyecto va a ser funcional, y podrá ser construido si se llega a eso. El hacer este proyecto también me ayudó a darme cuenta de cómo funcionan las estructuras de concreto, viendo ejemplos de diferentes proyectos para después llegar a un proyecto propio, ya que después de analizar ejemplos que han sido exitosos, podemos lograr lo mismo en nuestros diseños. Aprendí a analizar, y a desarrollar el efecto que tienen los diferentes elementos de la estructura y por lo tanto llegar a incluirlos en un proyecto. Esta materia cambió mi perspectiva de las estructuras, en las otras clases éstas *suelen ser lo último que considero*, pero me di cuenta de su importancia, de lo fácil que es hacer un proyecto después de tener la retícula que me da la estructura y de lo bonito que puede ser una estructura bien planeada”

Alumno de 5º semestre universidad Privada de México.

⁵¹ Profusión. abundancia excesiva, superfluidad.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Conclusiones del capítulo 4.

Las interacciones didácticas plantean una solución para desarrollar en el docente y el alumno la interacción con el mundo real, este desarrollo se llama competencia, con esto se logra la transformación de quien enseña y de quien aprende.

La enseñanza-aprendizaje de la composición arquitectónica empieza creando un discurso didáctico sobre las estructuras arquitectónicas y genera interés por identificar su potencial e incluirlas.

Siguiendo el proceso de diseño de Enrico Tedeschi, se incluye este discurso en el momento oportuno.

Capítulo 5
Casos de Estudio

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

El apartado de casos de estudio en el proceso de investigación consiste en la revisión y análisis de aquellos edificios que cuenten con características semejantes al tema elegido.

Se aplicó la metodología MOOA, con alumnos de arquitectura que cursan el 5 y 6 semestre en diferentes universidades, una Universidad pública y dos Universidades privadas.

5.1 Caso de Estudio 1.

Crown Hall de Mies Van der Rohe.

Este trabajo fue presentado por alumnos de 6º semestre de la Facultad de Arquitectura de la universidad pública, en la materia de sistemas estructurales II. Año 2015

Metodología MOOA.

1.- Estudio del edificio Análogo o referente.

Edificio: Crown Hall de Mies Van der Rohe.

Alumnos: Facultad de arquitectura, UNAM

Arquitecto: Mies van der Rohe

Ubicación: Chicago, USA

Año construcción: 1950-1956

Año restauración: 2005

Superficie en planta: 36,5×67m

Objetivo: Elegir una obra arquitectónica construida, para identificar su sistema estructural. En este caso se eligió el edificio Crown Hall de Mies Van der Rohe, cuya obra muestra sus elementos estructurales clasificados como pórticos.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS



Fig. 5.1 Edificio Crown Hall. Imagen tomada de <https://www.architecture.org/learn/resources/buildings-of-chicago/building/crown-hall/>

Después, se reinterpretará el sistema estructural y se propondrá un proyecto arquitectónico con intenciones espaciales exteriores con la intención de generar una forma orgánica.

Como primer paso se ubica una fotografía de la estructura del edificio análogo.

Fotos de la Estructura, Fig. 5.2. Se identifica el sistema estructural como pórtico de un vano. De acuerdo con la taxonomía de Engel corresponde al sistema SA-2, sistema de sección activa de pórticos.



Fig. 5.2 Estructura del Crown Hall. Foto tomada de <https://arquine.com/ejemplos-ejemplares-crown-hall/>

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Posteriormente se hace la comparación con la clasificación de Heino Engel.



Foto tomada de <https://arquine.com/ejemplos-ejemplares-crown-hall/>

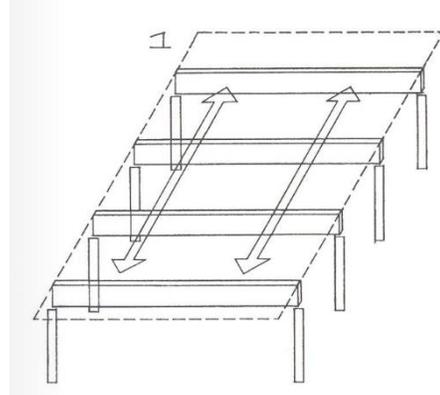


Fig. 5.4 Clasificación según Heino Engel.

Estructuras de sección activa. Pórticos de un vano. SA-2

(Adaptada de Engel, 2003. GG)

La configuración de un pórtico distribuye la carga del tablero directamente hacia cada pórtico. Los pórticos se encuentran desligados entre sí, es decir, no hay vigas que formen un marco en el otro sentido. Por lo tanto, la carga del tablero se distribuye solamente en una dirección.

Explicación del mecanismo del pórtico, se puede observar que los momentos se distribuyen hacia los nodos superiores, haciendo que la flexión en el centro del claro disminuya, por lo que se pueden librar claros más grandes con menos peralte.

2.- Reinterpretación del sistema estructural.

Una vez que se identificó el sistema estructural y su funcionamiento, se dio solución al planteamiento arquitectónico reinterpretando dicho sistema estructural.

Se planteó un proyecto conformado por dos volúmenes.

Se experimentó con la forma. Se laboraron diversas alternativas de la configuración de pórticos.

Al emplear estos pórticos como sistema estructural, se logró cierta libertad para desarrollar el proyecto, ya que se hizo una reinterpretación del Crown-Hall y se transformó en una

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

estructura más orgánica figuras 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10 con una configuración interior variable que cumplía con el partido arquitectónico y con la intención del objeto arquitectónico. Logrando solucionar claros de 14m al interior del edificio destinado a usos múltiples.

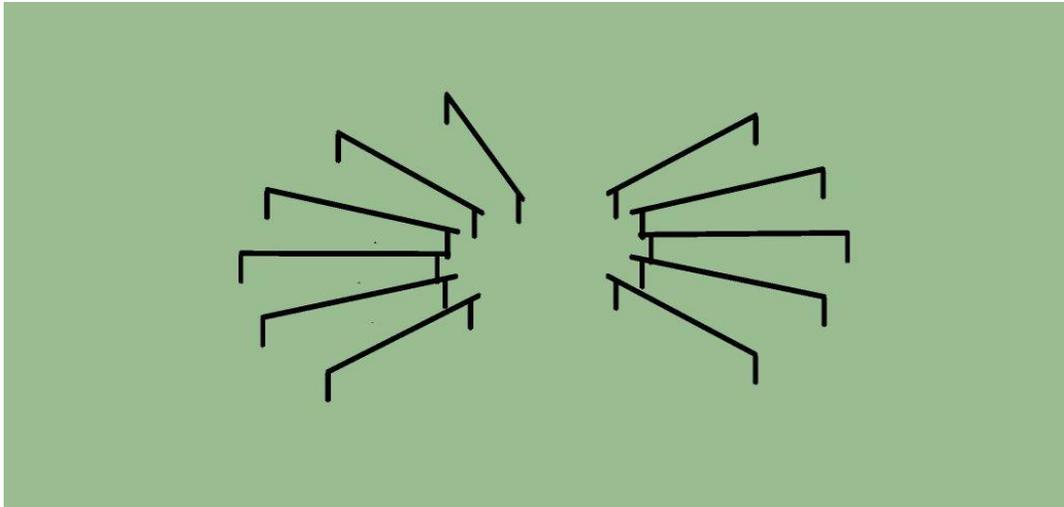


Fig. 5.6 Configuración orgánica sobre la disposición de los pórticos en planta baja. Imagen propia

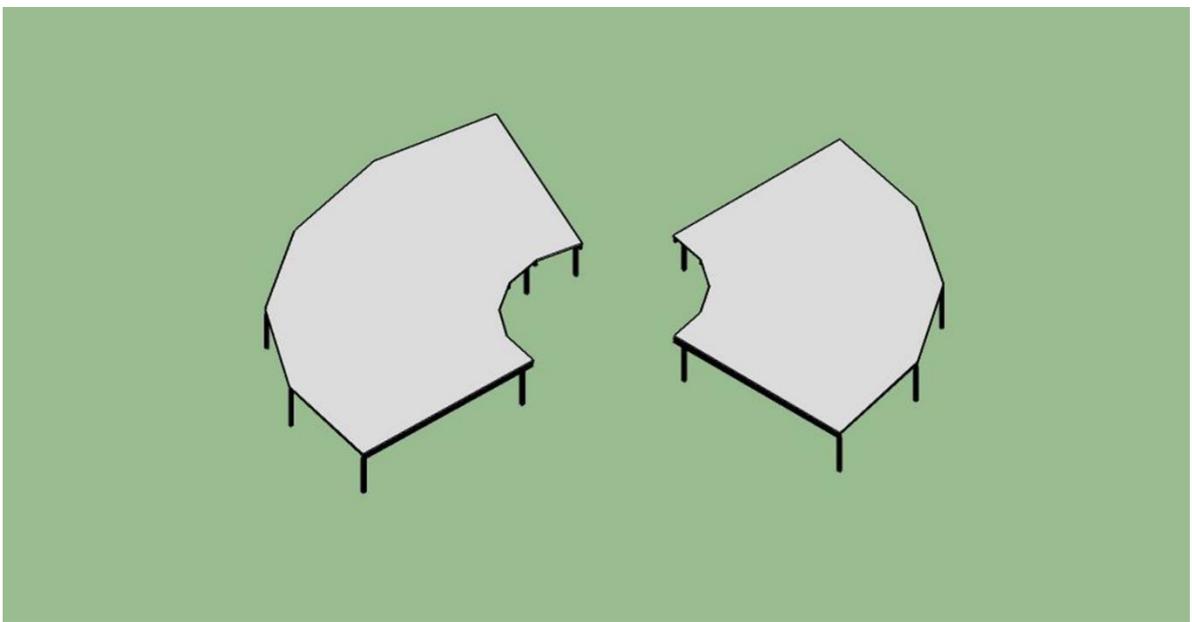


Fig. 5.7 Configuración de losa que cubre el sistema de pórticos. Imagen propia

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

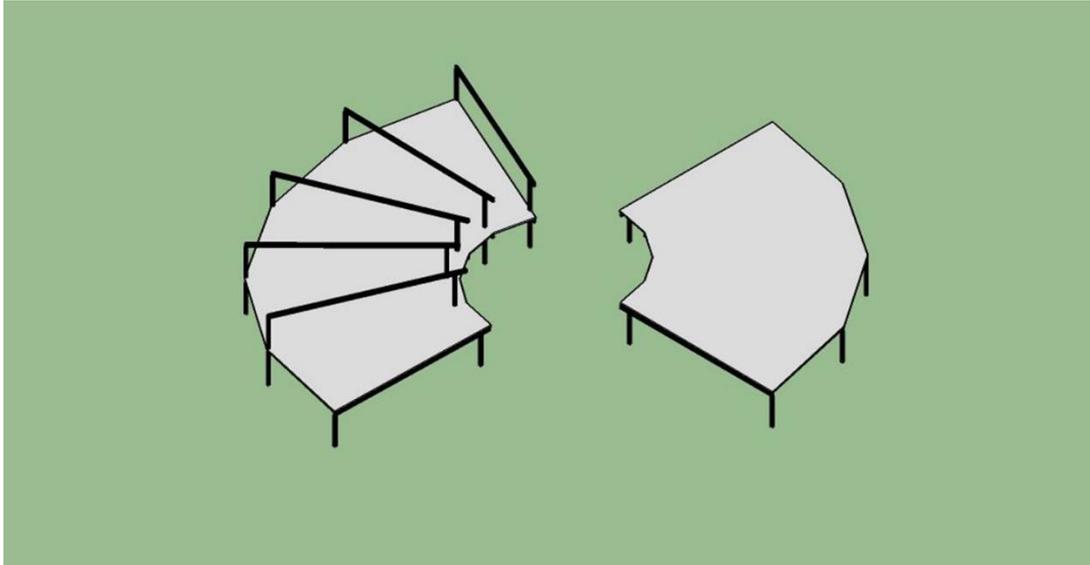


Fig. 5.8 Configuración de pórticos en planta alta. Imagen propia

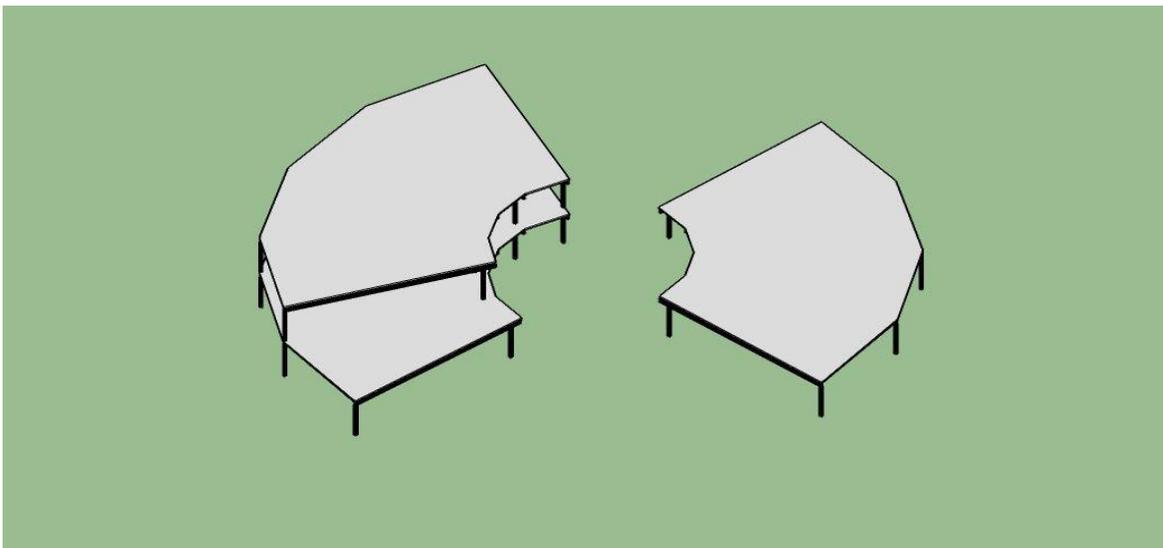


Fig. 5.9 Configuración de losas de planta alta. Imagen propia

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

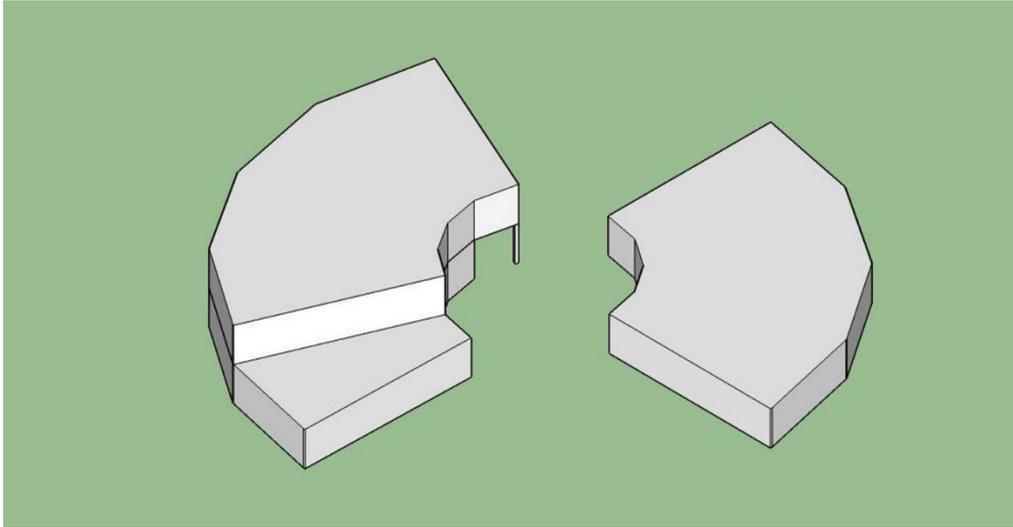


Fig. 5.10 Propuesta volumétrica del objeto arquitectónico como fruto de la comprensión del sistema estructural de pórtico. Imagen propia

Si esta propuesta no satisface la intención arquitectónica del objeto, ya sea cualidades espaciales interiores o exteriores, se regresará a la etapa inicial de búsqueda para proponer una nueva configuración de sistemas de pórticos, o buscar un nuevo sistema estructural, antes de pasar a la siguiente etapa.

Esta fase pretende que el alumno experimente y compruebe que, dentro de una misma envolvente constructiva, existen cualidades espaciales diferentes al variar los esquemas estructurales interiores, siendo todos ellos viables desde la perspectiva de la ingeniería estructural.

3.- Desarrollo de la propuesta de diseño estructural.

Propuesta del proyecto arquitectónico con las intenciones espaciales interiores y exteriores que el sistema estructural hace posible y elaborar su maqueta estructural, identificando el sistema estructural y sus componentes. Realizar el diseño estructural de los elementos estructurales, la materialidad y el cálculo, geometría y estabilidad.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

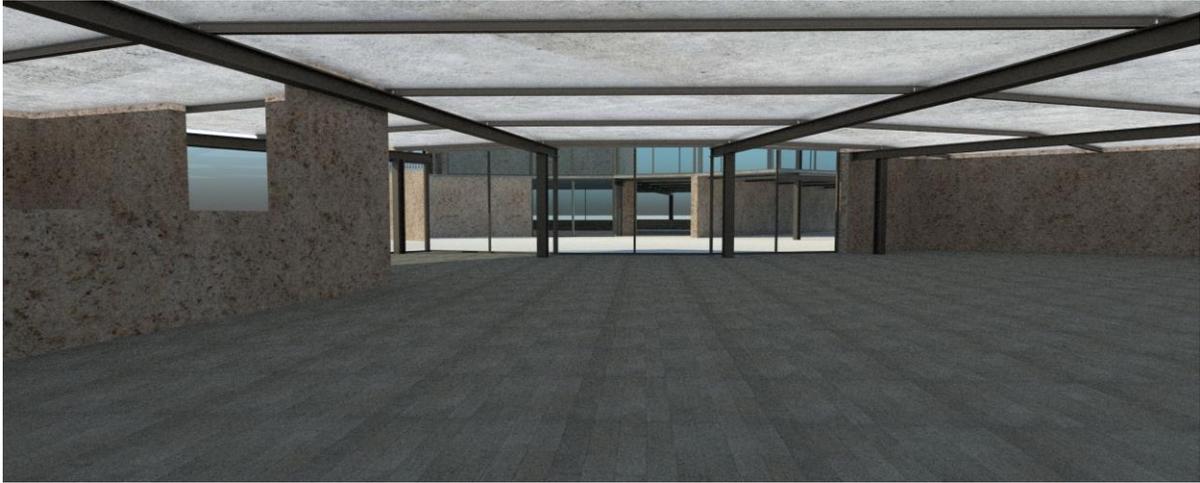


Fig. 5.11 Imagen que muestra la estructura integrada al proyecto arquitectónico de acuerdo a la metodología MOOA.

En la etapa de diseño estructural, los conceptos y el sentido común son tan importantes como las herramientas numéricas. Se considera que, si el planteamiento es viable en su concepto (taxonomía de los sistemas estructurales) y sentido común (reinterpretación de los sistemas estructurales), el proyecto se puede considerar diseñado, aunque no tenga pre-dimensionamientos. Posteriormente los softwares, se encargarán de las dimensiones. En este ejercicio no se presentan los cálculos, sin embargo, se presenta el correcto planteamiento estructural de acuerdo con la metodología propuesta MOOA. Fig. 5.11

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

5.2 Caso de estudio 2.

El siguiente caso de estudio fue desarrollado por alumnos del Escuela privada 1 en el año 2023.

Escuela de Arquitectura, Arte y Diseño.

En este trabajo los alumnos tenían como reto desarrollar el programa arquitectónico de un Centro Cultural y Cafetería El Péndulo.

Los alumnos tuvieron la oportunidad de tener la asesoría en conjunto de 4 áreas: Contexto Urbano (ver anexo 1), Teoría de la Arquitectura, Diseño Arquitectónico y Estructuras. Durante este semestre los alumnos fueron desarrollando su trabajo para tener en claro que su partido arquitectónico (composición arquitectónica) fuera coherente con el contexto y con la estructura. Por lo que se fue posible aplicar desde el componente de estructuras, la teoría de las Estructuras Arquitectónicas desarrollada en este trabajo.

Metodología MOOA.

Paso 1.- Casos análogos.

Como primer paso, los alumnos investigaron diferentes casos análogos, (ver fig. 5.12) e identificaron su sistema estructural de acuerdo con la clasificación de Heino Engel. En este paso se les explica cómo funciona el sistema estructural elegido y cómo forma parte de la composición arquitectónica.

El edificio estudiado es el BUNJIL PLACE⁵², ubicado en City of Casey, Australia. Edificio de usos mixtos ubicado en Australia que funciona como teatro, biblioteca, galería y espacio público. El punto central de esta obra es su cubierta de madera laminada que aparte de darle personalidad al proyecto, tiene fines acústicos y escultóricos.

Despacho que proyectó: FJMT.

Año en el que se finalizó: 2017

Bunjil Place brinda a la comunidad un centro cultural en el este de Melbourne. Este proyecto innovador ha ganado nueve premios importantes hasta la fecha, incluido el Premio Australiano de Diseño de Madera 2018 - Excelencia en Diseño de Madera y el Premio Victoriano Australiano a la Excelencia en Ingeniería. Diseñado para convertirse en un centro cultural en Melbourne East, el nuevo edificio involucró complejos desafíos de diseño y entrega en plazos exigentes.

⁵² <https://www.theplan.it/eng/award-2019-culture/bunjil-place>

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

La característica dominante del edificio es una rejilla de madera, la primera de su tipo en Australia, que define el atrio principal. Esta impresionante área central incorpora una fachada de vidrio de 12 m de altura frente a una gran plaza comunitaria más allá.

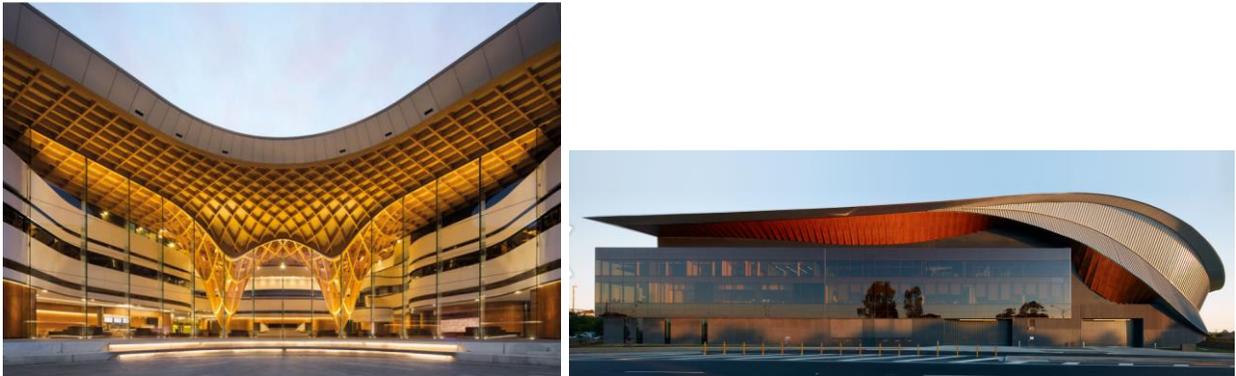


Fig. 5.12 Fotografías que muestran el interior y exterior del edificio de usos mixtos ubicado en Australia.

Fotos tomadas de <https://www.ttw.com.au/projects/bunjil-place>

El edificio tiene 3 sistemas estructurales, uno para sostener los niveles de entresuelos de concreto que funciona con sección activa, la estructura que se utiliza para sostener la losa de madera laminada que funciona por vector activo y la cubierta de madera laminada que funciona por superficie activa.

El sistema de superficie activa está formado por el caparazón hecho de formas 3D geométricamente complejas, el equipo de TTW Advance llevó a cabo una investigación detallada de búsqueda de formas, que requirió el modelado de la rejilla de madera como un elemento de carga estructural que sostiene el techo

El Modelo de análisis estructural, ver fig. 5.13 muestra las deflexiones estimadas bajo carga de gravedad. El modelo consideró los efectos de los miembros y la geometría de la cubierta de la rejilla de madera, los movimientos de fluencia a largo plazo y la flexibilidad en las juntas.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

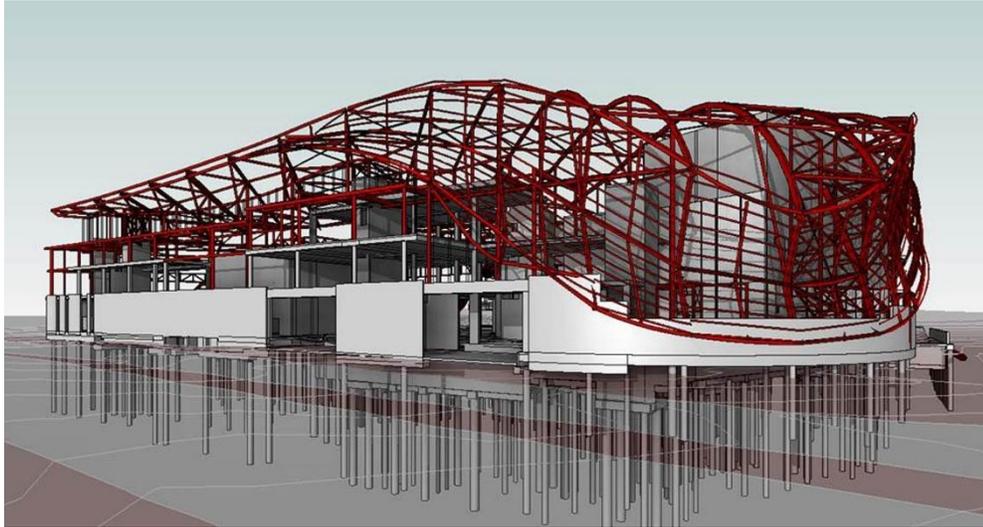


Fig. 5.13 Modelado de la estructura de la cubierta. Foto tomada de <https://www.ttw.com.au/projects/bunjil-place>

La forma del techo creó desafíos específicos en el detalle de la estructura de acero, con conexiones complicadas que requerían modelado de elementos finitos. Los ingenieros de TTW trabajaron en estrecha colaboración con arquitectos y contratistas de madera para optimizar la forma del techo de madera dentro de las limitaciones del diseño espacial. El resto de la estructura del techo de forma libre está construido de acero con voladizos espectaculares en los bordes del edificio.

De acuerdo con la taxonomía de Heino Engel, la cubierta es un Sistema de Vector Activo. VA 3.- Armaduras o Cerchas curvas. Más específicamente cercha de superficie de doble curvatura, formada por 6 paraboloides hiperbólicos. Ver fig. 5.14

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

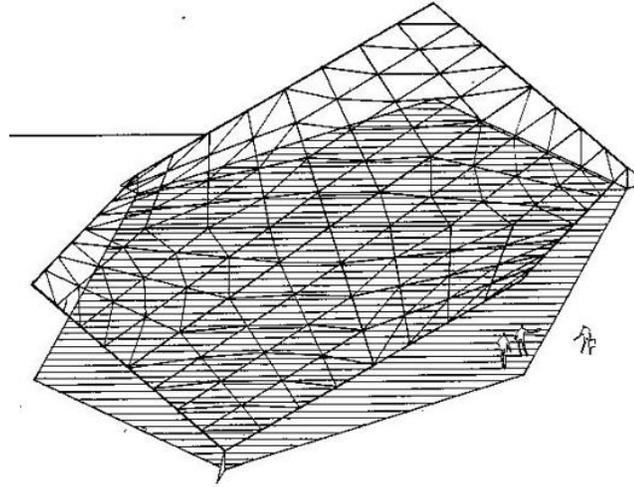


Fig. 5.14 Sistema de Cercha formada por 6 paraboloides hiperbólicos de acuerdo con Heino Engel. (Adaptada de Engel, 2003, GG)

En el modelo 3D de la cubierta se puede apreciar una superficie de madera laminada cuyos elementos se unen para formar mecanismos que transmiten las fuerzas. La forma de la superficie es esencial para que funcione el mecanismo, esta debe ser la continuidad y que el perímetro de esta esté rigidizado. Ver fig. 5.15

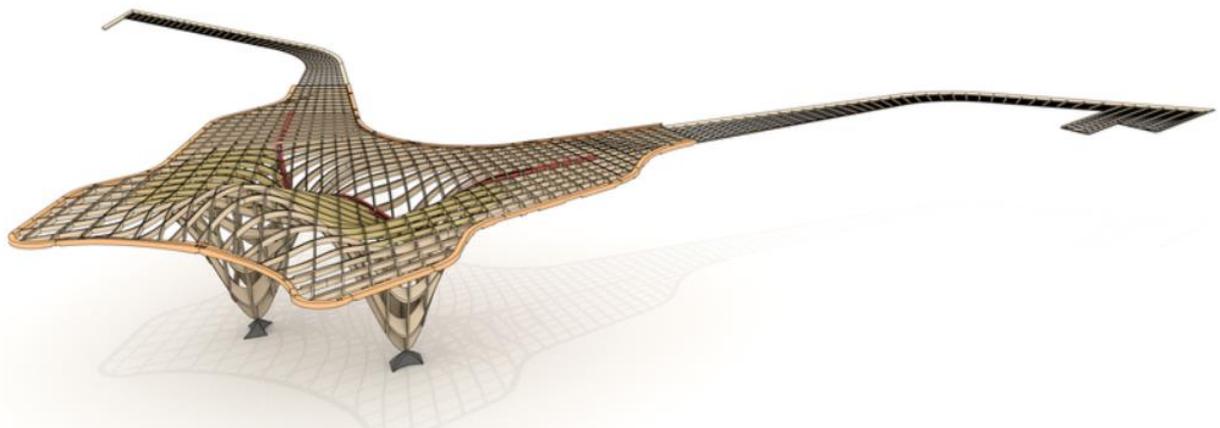


Fig. 5.15 Imagen que muestra la forma de la superficie de la cubierta. Tomado de <https://www.hess-timber.com/en/references/detail/bunjil-place/>

También se puede apreciar el sistema de vector activo para los sistemas de entrepiso, fig. 5.16 y de sección activa fig. 5.17

VECTOR ACTIVO

En el siguiente diagrama se puede observar los diferentes tipos de elementos que conforman esta estructura, por ejemplo los elementos azules están conformados por barras de acero traccionadas y comprimidas juntas de forma que hacen un triángulo.

A mayor escala forman un sistema de cordón superior de cerchas planas y en la parte superior se ve como existen bastidores de 4 articulaciones, en los lugares donde no hay cargas asimétricas se deben colocar barras diagonales para convertirlas en cerchas.

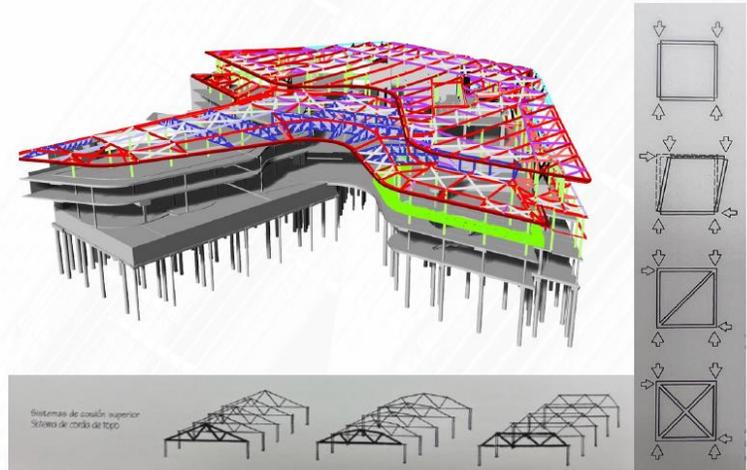
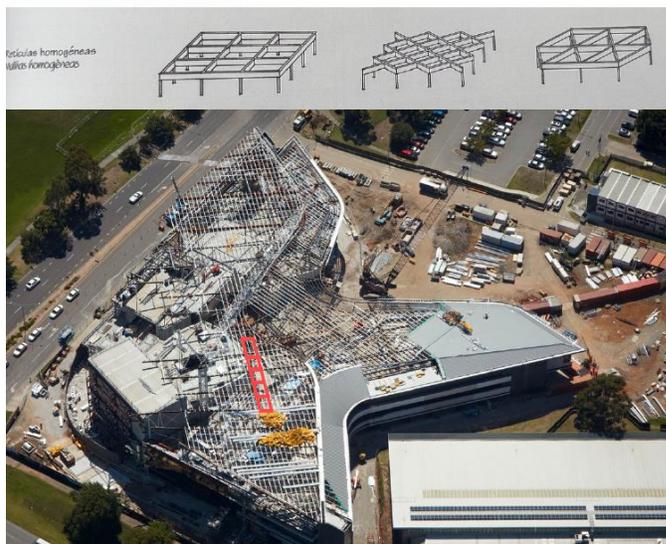


Fig. 5.16 Imagen que muestra el sistema de vector activo para el entrepiso.

Tomado de <https://www.hess-timber.com/en/references/detail/bunjil-place/>

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS



SECCIÓN ACTIVA

En estas imágenes observamos que para hacer los entresijos de concreto del edificio, se utilizaron 2 estructuras de retícula homogénea de vigas de acero en 2 direcciones para desviar las fuerzas verticales de forma horizontal para posteriormente transmitirlos a los apoyos. Se identifica como sección activa por su característica forma rectangular tanto en fachada como en losas.



Fig. 5.17 Imagen que muestra el sistema de sección activa en el sistema de entresijos.

Tomado de <https://www.hess-timber.com/en/references/detail/bunjil-place/>

Paso 2.- Reinterpretar el sistema una vez definido el concepto arquitectónico. – El alumno plantea su concepto y lo teje de la mano con el sistema estructural que ha estudiado. Reinterpretando el sistema y adaptándolo a su concepto y viceversa, tejiendo su modelo de acuerdo con el análogo estudiado. Se muestra el concepto en la fig. 5.18, la planta de conjunto en la fig. 5.19, la maqueta que muestran la estructura integrada al proyecto en la fig. 5.20 y los cortes en la fig. 5.21.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS



TECNOLÓGICO DE MONTERREY

nuestro concepto

Con el objetivo de generar un **impacto en la comunidad**, nace este proyecto que toma en cuenta **estética, materialidad, función** y sobre todo **alma/autenticidad** generando a su vez una sensación de pertenencia y conexión con cada uno de los usuarios.

Presentación de proyecto:
Cafebrería Péndulo del valle

Fig. 5.18 Imagen que muestra el trabajo presentado por los alumnos, en donde definen el concepto que regirá su proyecto.

El concepto replantea las áreas del centro cultural tradicionales y propone nuevas formas de que se vivan y sobre todo de que persistan estos escenarios creando espacios más libres y versátiles. Esto a través de su sistema constructivo y estructural que permite la creación de formas innovadoras en espacios clave que brindan carácter al proyecto.

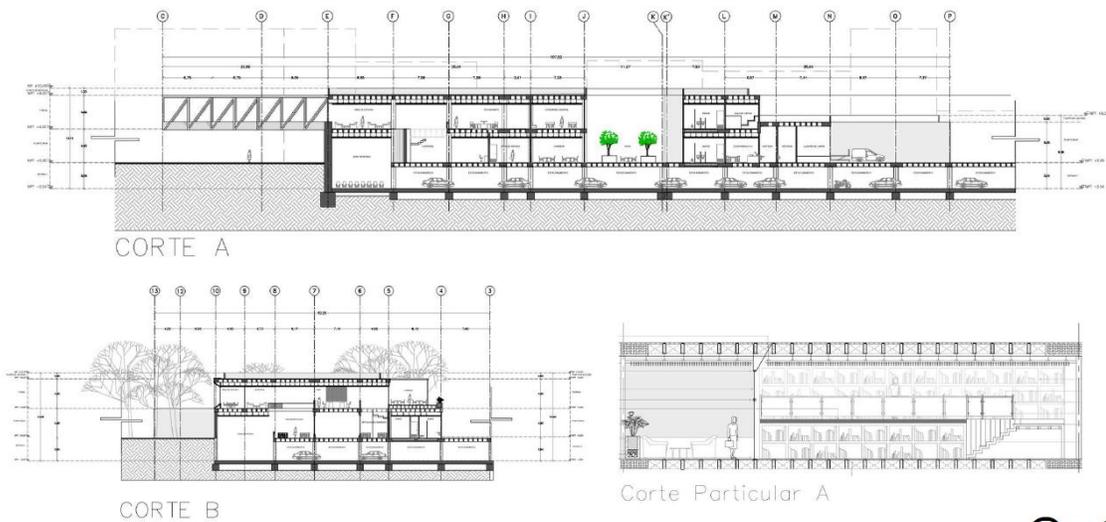


Fig. 5.19 Imagen de la planta de conjunto.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS



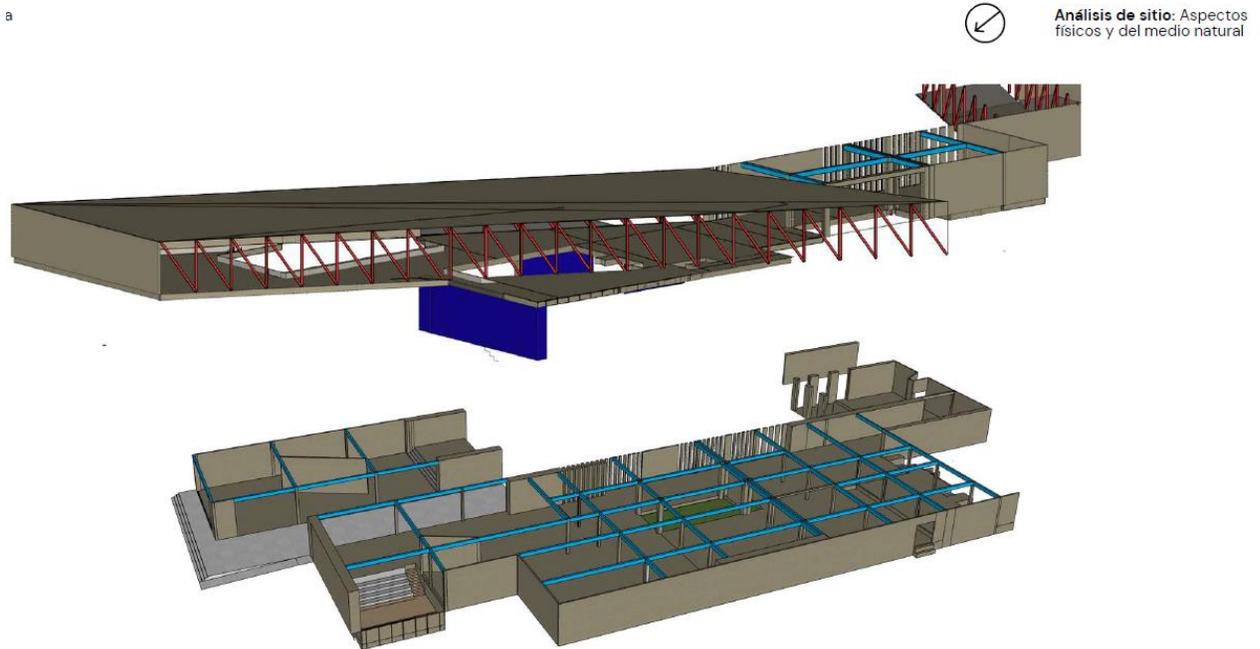
Fig. 5.20 Maqueta del proyecto en donde muestran los voladizos librados con el sistema de vector activo.



Cortes

Fig. 5.21 Imagen que muestra la estructura como parte de la propuesta arquitectónica.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS



Estructura

Fig. 5.22 Imagen que muestra la estructura que da forma al proyecto arquitectónico.

Conclusión del caso de estudio 2.

Este caso de estudio se muestra porque se logró el objetivo de la reinterpretación de los sistemas estructurales estudiados.

Los alumnos estudiaron un caso análogo que tenía mucha información disponible en internet, lo que permitió orientarlos en cada uno de los sistemas estudiados.

Del caso análogo, tomaron varios conceptos estructurales y los trasladaron a su proyecto, logrando hacer la reinterpretación del caso análogo.

El tema eje que se observó en los alumnos fue la idea de librar grandes claros con armaduras y con formas rectas en lugar de las curvas provistas en el caso de estudio.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

El estudio de las armaduras les mostró la posibilidad de crear un carácter personal de sus propuestas arquitectónicas, y en palabras de los alumnos, ahora es parte de su expresión y lenguaje arquitectónico.

Los alumnos plantearon su proyecto estructural en función del estudio de los sistemas estructurales de los edificios análogos, ayudándose de la taxonomía de Engel. Lo que les permitió generar una materialidad que hiciera posible su concepto planteado.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

5.3 Caso de estudio 3.

Este proyecto fue desarrollado por alumnos de la Universidad privada No. 2. En el semestre agosto-diciembre del 2021 del sexto semestre de la carrera de Arquitectura.

Paso 1.- Casos análogos.

Se analizó el edificio del Centro de Diseño Sharp-Ontario College of Art & Design⁵³ ⁵⁴Fig. 5.23 y 5.24 que se encuentra en Toronto, Ontario, Canadá.

Arquitecto: ROBBIE / YOUNG + WRIGHT ARQUITECTOS, WILL ALSOP

Año: 2002-2004

Se trata de un proyecto, con espacio para estudios de arte, espacios para la enseñanza, salas de conferencias, espacios de exposición y oficinas de la facultad.



Fig. 5.23 Centro de Diseño Sharp Ontario College of Art & Design. *Nota.* Adaptado de <https://www.waltersgroupinc.com/project/ocad/>

⁵³ Recuperado de <https://www.waltersgroupinc.com/project/ocad/>

⁵⁴ Portal de arquitectura Arqhys.com. Equipo de redacción profesional. (2012, 12). Centro de Diseño Sharp. Escrito por: Arqhys Construcción. Obtenido en fecha 07, 2023, desde el sitio web: <https://www.arqhys.com/construccion/centro-sharp.html>.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

DIMENSIONES

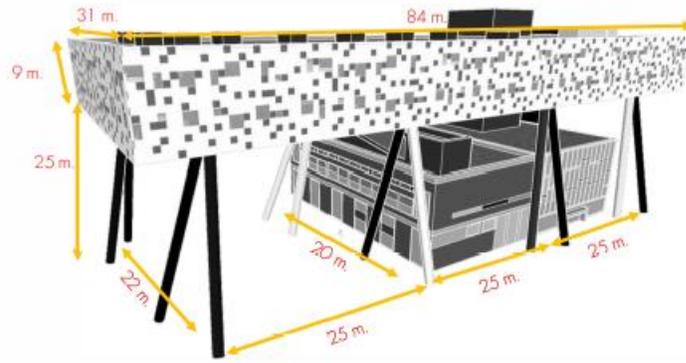


Fig. 5.24 Dimensiones generales del Centro de Diseño Sharp-Ontario College of Art & Design

La renovación de la Universidad de Arte y Diseño de Toronto, Canadá, es un proyecto que se completó en fases. Esta intervención incluye una imponente estructura en forma de paralelepípedo, conocida como la “mesa elevada”, cuya distintiva fachada en blanco y negro tiene una altura de 26 metros sobre el suelo. La nueva ampliación alberga dos niveles destinados a espacios de estudio y enseñanza, conectados al edificio original mediante un ascensor y un núcleo de escaleras, que constituyen el foco central de un nuevo vestíbulo, uniendo así las dos secciones del campus universitario en todos los niveles. La elevación de la estructura permite la creación de un nuevo espacio público exterior al sur del edificio existente, proporcionando un acceso peatonal fluido entre la calle y el parque situado al oeste, a la vez que preserva las vistas para los residentes del condominio al este de la universidad. (Portal de Arquitectura Arqhys s.f.)

Ganó el premio RIBA Worldwide en 2004 y el premio de diseño urbano de la ciudad de Toronto en 2006. Ver planos Arquitectónicos. Fig. 5.24 y 5.25.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

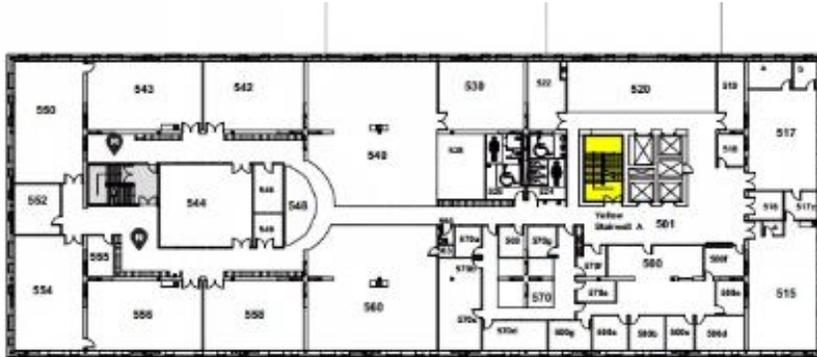


Fig. 5.24 Planta baja arquitectónica. *Nota.* Adaptado de <https://www.waltersgroupinc.com/project/ocad/>

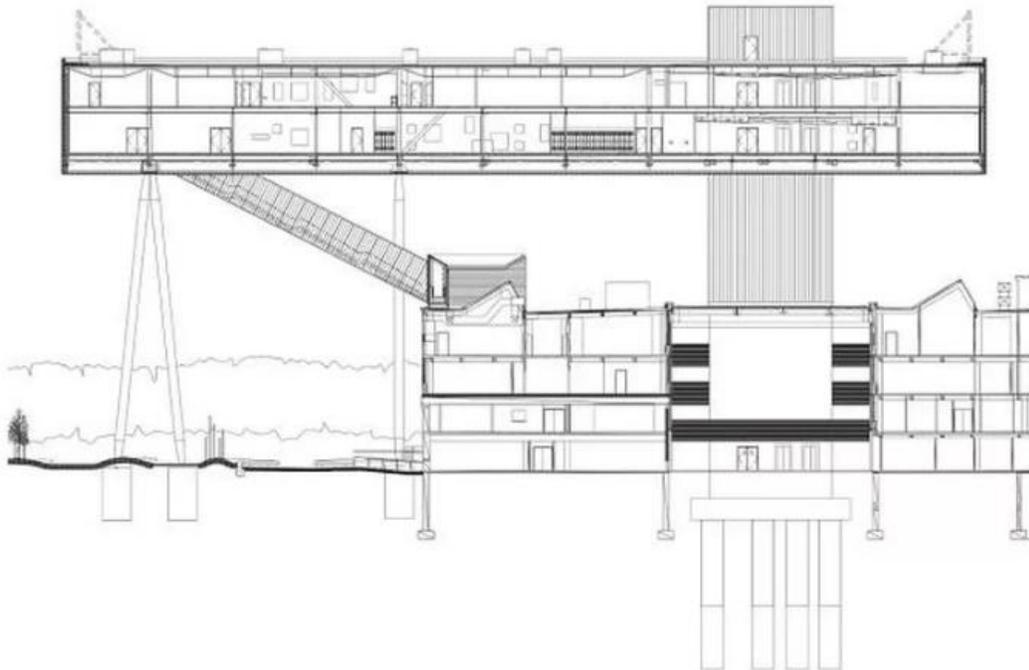


Fig. 5.25 Corte longitudinal. *Nota.* Adaptado de <https://www.waltersgroupinc.com/project/ocad/>

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Estructura.

La construcción está sostenida por 12 columnas (ver figura 5.26). En el centro, hay una estructura de núcleo hecha de concreto reforzado que ayuda a rigidizar toda la construcción. Toda la estructura descansa sobre una serie de bases de concreto.

Las columnas de acero se fabricaron fuera del sitio de construcción. Debido al gran tamaño del diámetro de las secciones de acero utilizadas en estas columnas, se usaron tubos de acero que normalmente se emplean en la industria del petróleo para hacer las columnas principales. La estructura se diseñó para ser una caja rígida de acero. (Portal de arquitectura Arqhys, s.f.)⁵⁵. Ver fig. 5.27, 5.28, 5.29 y fig. 5.30

Ingeniero estructural ⁵⁶ por Carruthers y Wallace.

Tiene un sistema lateral único en su tipo que requiere un lanzamiento desde el núcleo de concreto y un amplio programa de obras temporales

Núcleo de
concreto

⁵⁵ Portal de arquitectura Arqhys.com. (s.f.) Equipo de redacción profesional. Centro de Diseño Sharp. Escrito por: Arqhys Construcción. Obtenido en fecha 07, 2023, desde el sitio web: <https://www.arqhys.com/construccion/centro-sharp.html>.

⁵⁶ Tomado de <https://www.waltersgroupinc.com/project/ocad/>

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

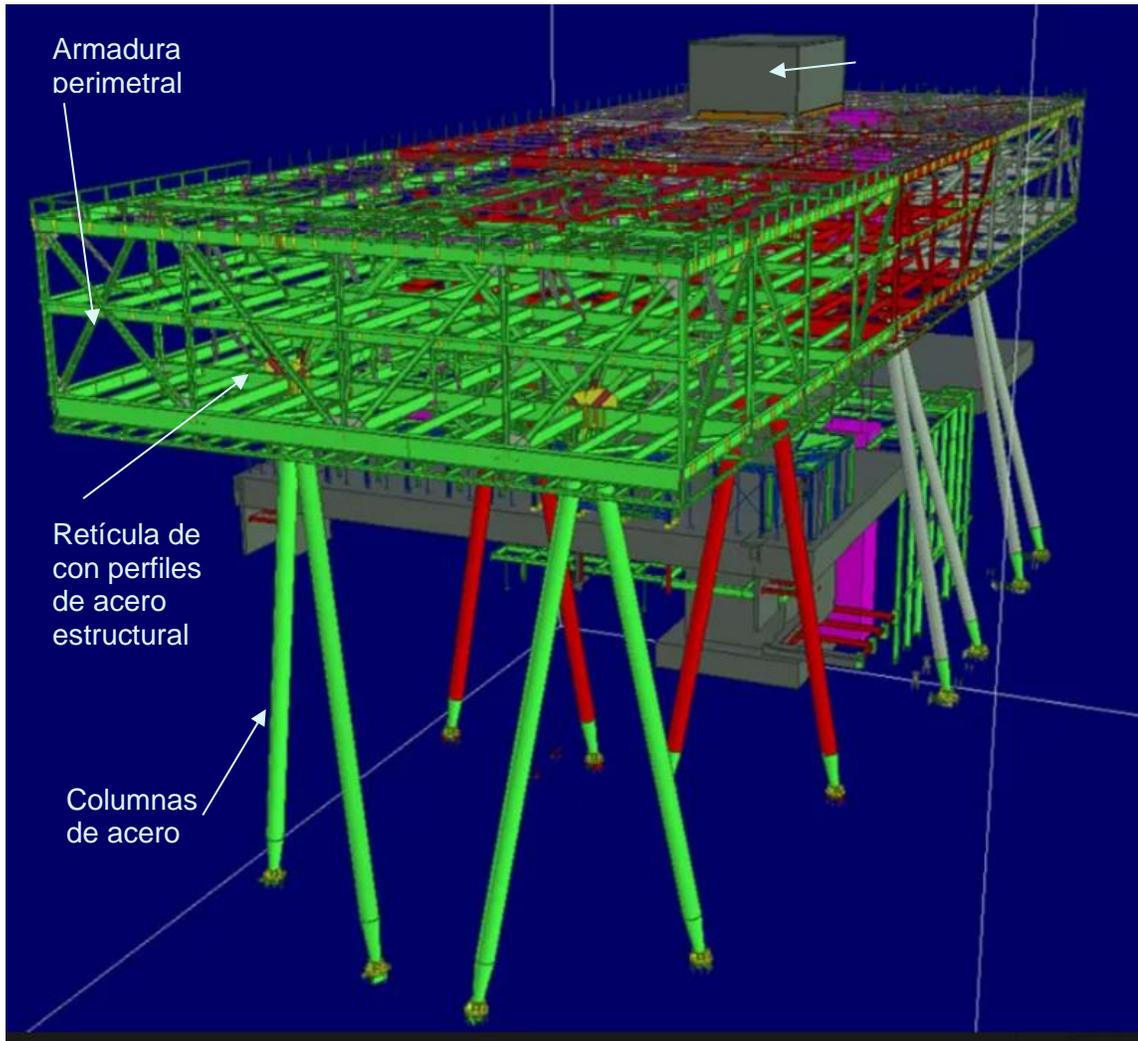


Fig. 5.26 Modelo de la estructura en acero. *Nota.* Adaptado de <https://www.waltersgroupinc.com/project/ocad/>

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

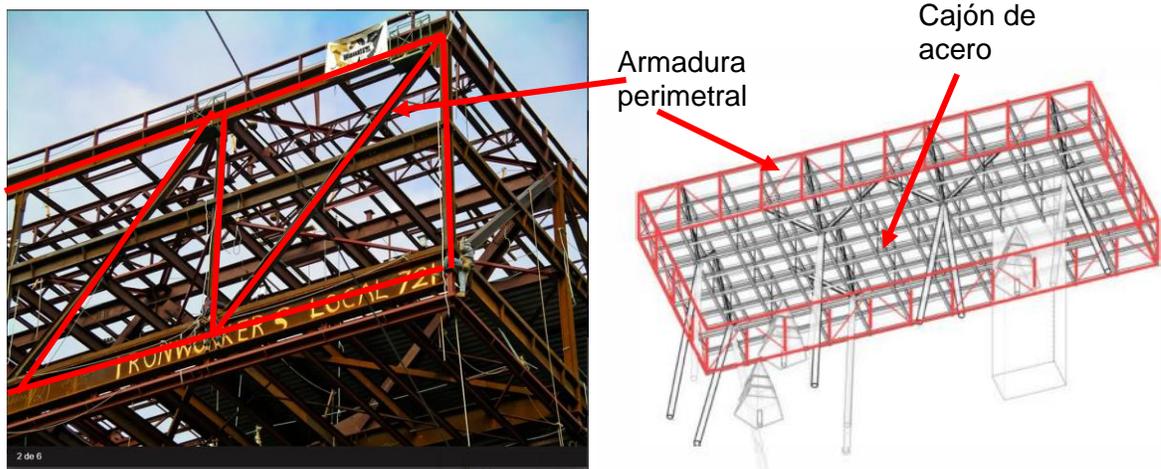


Fig. 5.27 Identificación del sistema de Armadura y del cajón de acero. *Nota.* Adaptado de <https://www.waltersgroupinc.com/project/ocad/>



Fig. 5.28 Identificación de los perfiles de acero y detalle constructivo de las columnas. *Nota.* Adaptado de <https://www.waltersgroupinc.com/project/ocad/>

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

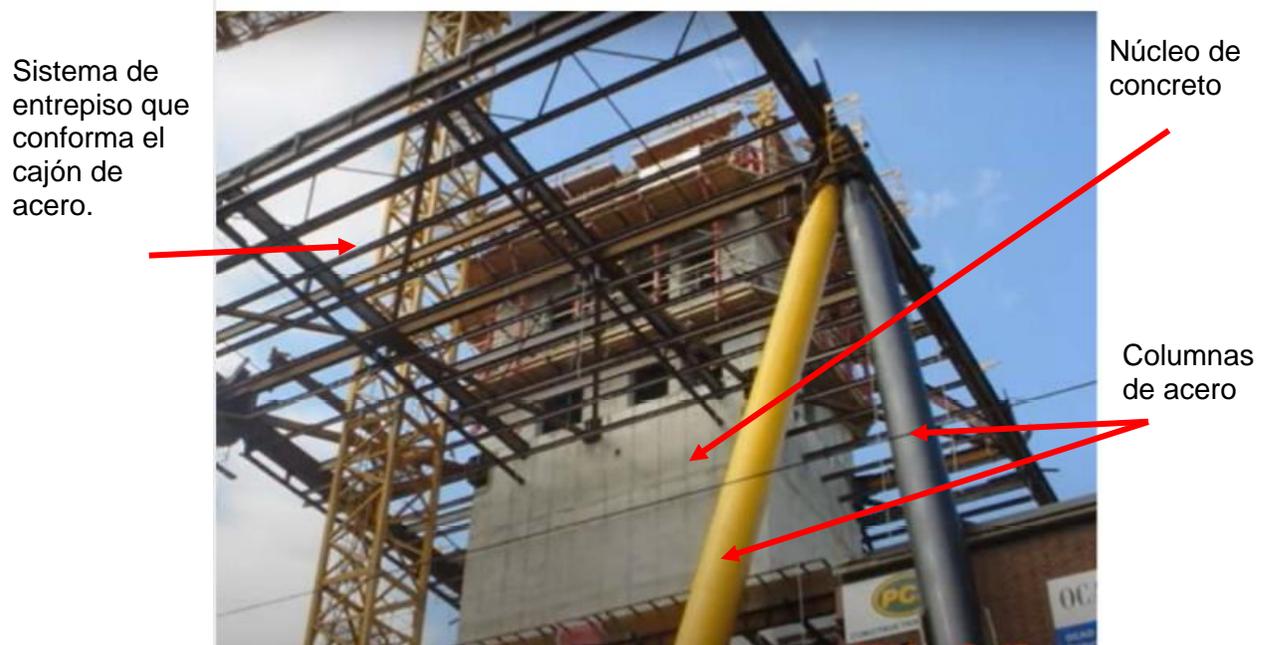


Fig. 5.29 Conexión del núcleo y el sistema cajón de acero. *Nota.* Adaptado de <https://www.waltersgroupinc.com/project/ocad/>



Fig. 5.30 Fabricación de columnas de acero con sus conexiones. *Nota.* Adaptado de <https://www.waltersgroupinc.com/project/ocad/>

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

CLASIFICACIÓN SEGÚN HEINO ENGEL

Se identifican 3 sistemas de acuerdo a la clasificación de Heino Engel. De vector activo en la armaduras perimetrales (VA1), de sección activa (SA3), fig. 5.31, en la conformación del sistema de entrepiso y de núcleo central (AA3) en el núcleo de concreto.

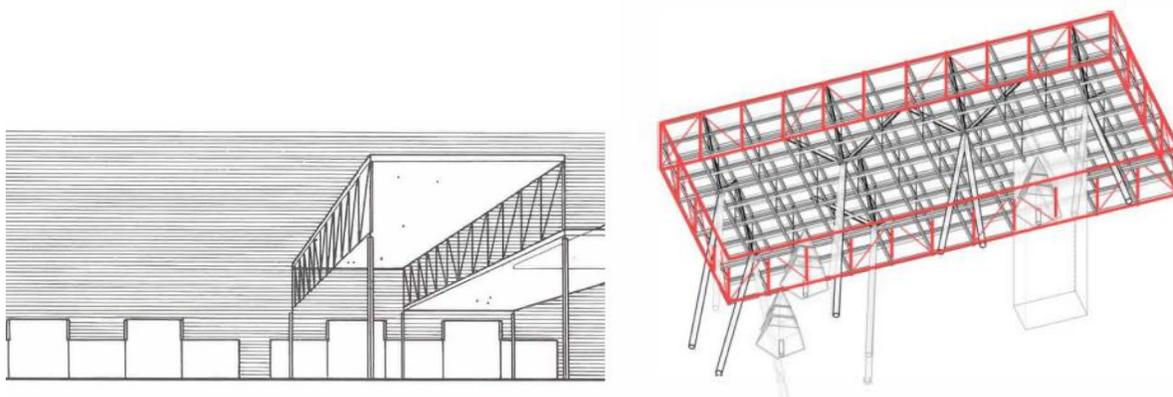


Fig. 5.31. Clasificación de Vector Activo VA1. Cerchas Planas.

(Adaptado de Engel, 2003, GG e imagen propia)

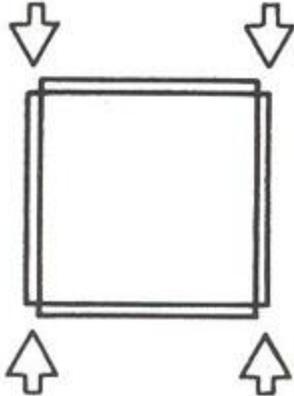
Los sistemas de estructuras de vector activo son una solución en la arquitectura moderna. Estos sistemas están compuestos por elementos lineales, como barras, que permiten una distribución de las fuerzas a través de la descomposición vectorial. Las fuerzas se dividen en múltiples direcciones, lo que optimiza el uso de materiales.

En este tipo de sistema, las barras se someten a compresiones y tracciones, lo que les confiere un carácter mixto. La aplicación de fuerzas ofrece una versatilidad notable, permitiendo que las estructuras sean tanto resistentes como eficientes. En resumen, los sistemas de estructuras de vector activo representan un logro técnico significativo en el diseño arquitectónico.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

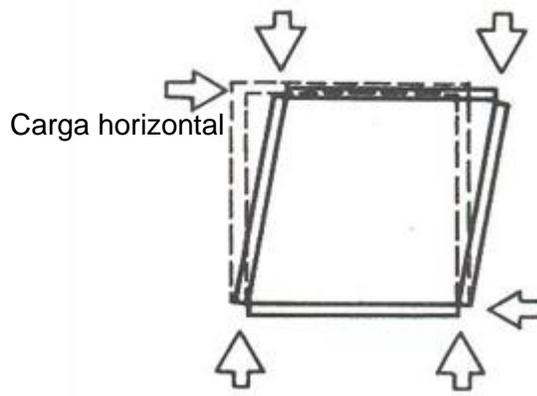
Arriostramiento de armadura (cercha) mediante triangulación de cada bastidor para evitar su deformación. Ver fig. 5.32

Carga vertical



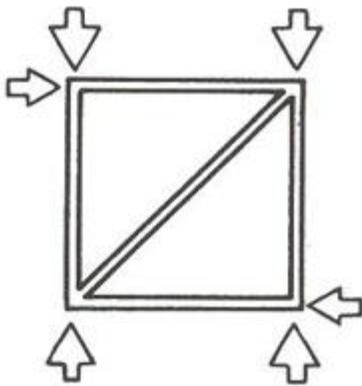
Un bastidor con cuatro articulaciones en las esquinas solo está en equilibrio en teoría.

Carga vertical

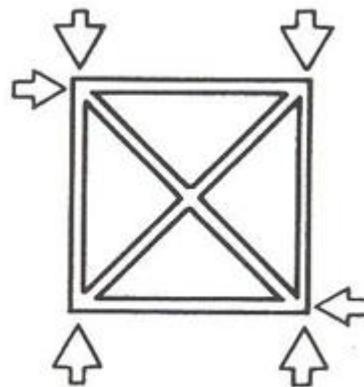


Carga horizontal

Con una carga asimétrica, el sistema se deforma en las esquinas por lo que se debe rigidizar.



Las barras diagonales impiden la deformación. El bastidor se convierte en armadura (cercha).

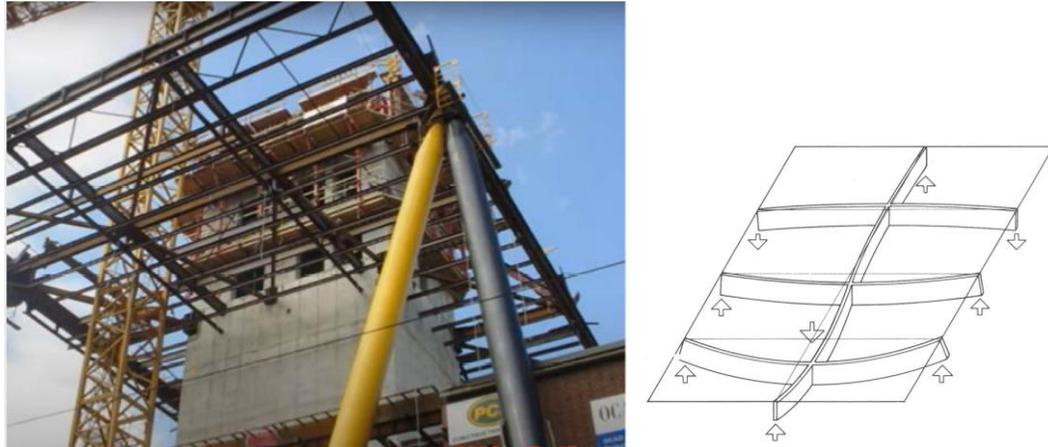


Una segunda barra diagonal aumenta el arriostramiento, pero resulta innecesario para efectos vectoriales.

Fig. 5.32 Funcionamiento del sistema de vector activo. (Imagen propia)

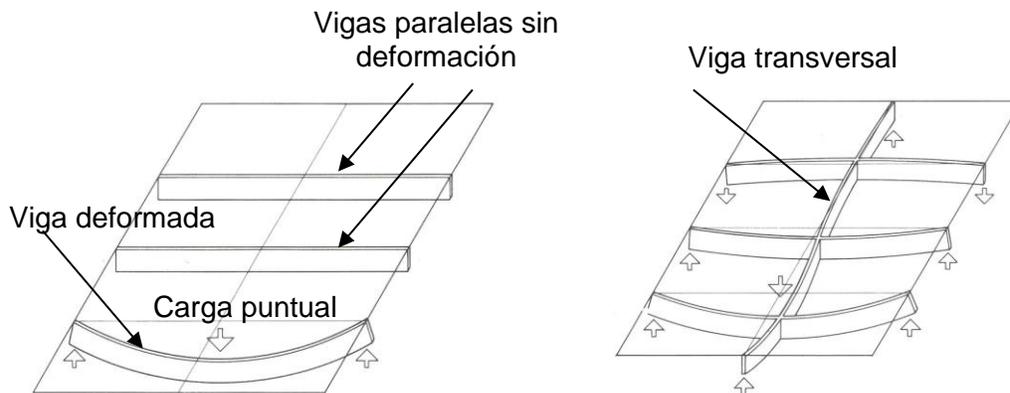
ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Sección activa (SA3). Sistema de retículas de vigas. El sistema de entrepiso está conformado por una retícula de vigas de acero estructural. Ver fig. 5.33



5.33 Comparación del sistema de retículas de vigas del análogo Vs Heino Engel. (Imagen Adaptado de <https://www.waltersgroupinc.com/project/ocad> e imagen propia)

En seguida se muestra el funcionamiento del sistema de retículas de vigas, ver fig. 5.34



En las estructuras de vigas paralelas, sólo se deforma la viga sometida a la carga puntual. Las otras vigas no participan en el mecanismo de resistencia frente a carga puntual.

Cuando se agrega una viga transversal, que está colocada en ángulo recto respecto al sistema de vigas existente, parte de la carga se distribuye a las vigas paralelas adyacentes. En este escenario, todos los componentes estructurales trabajan juntos para soportar la carga puntual aplicada. Esta colaboración entre elementos asegura que la estructura resista eficientemente las fuerzas aplicadas.

Fig. 5.34 Comparación del sistema de vigas paralelas Vs. Retícula de vigas. (Imagen propia)

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Finalmente se muestra el funcionamiento del sistema de núcleo, cuya función es rigidizar contra cargas horizontales y transmitir las cargas hacia la cimentación. Fig. 5.35

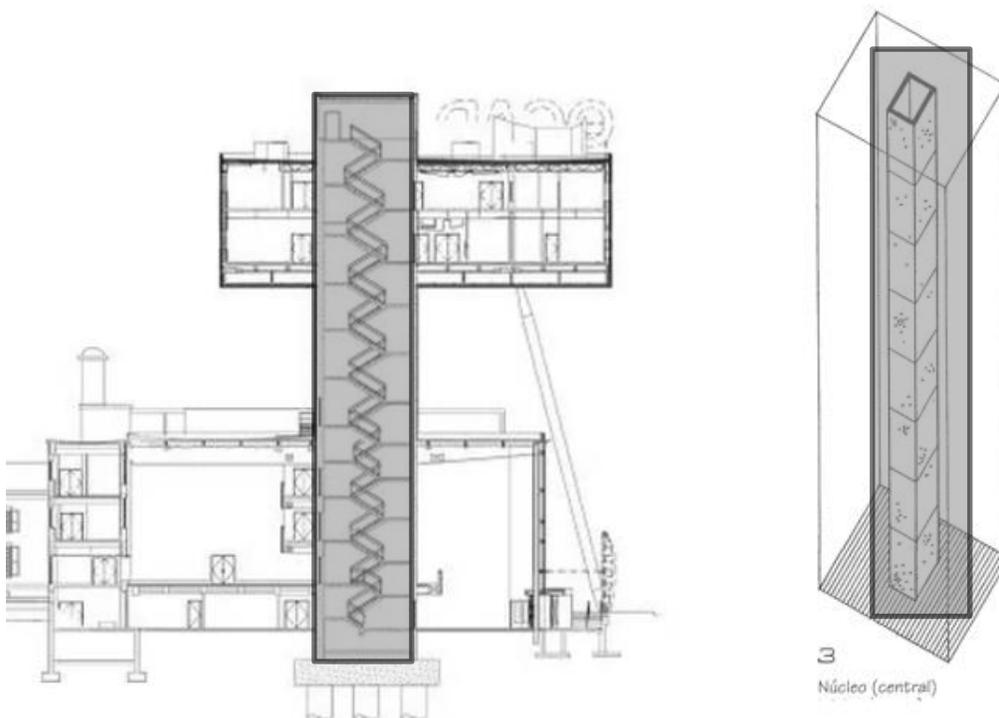


Fig. 5.35 Comparación del sistema de núcleo del edificio análogo Vs Sistema de Núcleo de Heino Engel. (Imagen Adaptado de <https://www.waltersgroupinc.com/project/ocad> e imagen propia)

Debido a la altura de ciertas estructuras, estas están expuestas a cargas horizontales como sismos y viento. Por esta razón, la rigidización lateral se convierte en un aspecto clave al diseñar sistemas de estructuras verticales. A partir de cierta altura sobre el suelo, la manera en que se transmiten las fuerzas horizontales puede influir significativamente en la forma del edificio. En este caso, la rigidización se logra mediante un núcleo, que debe ser continuo desde la parte superior de la estructura hasta la cimentación

La rigidización evita los desplazamientos excesivos de la estructura. Para el caso del Centro de Diseño Sharp-Ontario College of Art & Design, la rigidización fue por núcleo de concreto en lugar de diagonales.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Paso 2.- Reinterpretar el sistema una vez definido el concepto arquitectónico. – El alumno plantea su concepto y lo teje de la mano con el sistema estructural que ha estudiado. Reinterpretando el sistema y adaptándolo a su concepto y viceversa, tejiendo su modelo de acuerdo con el análogo estudiado. Se muestra el concepto en la fig. 5.36, la planta de conjunto en la fig. 5.37, cortes, fachadas y renders en las figuras 5.38, 5.39, 5.40 respectivamente. La propuesta estructural se muestra en la figura 5.41.



Mi propuesta se basará en el diseño de una biblioteca de 150 m² situada a 6 metros de altura, contará con estanterías, una cafetería y área de estudio. No será necesario el uso de muros divisorios ya que se emplearán estanterías para separar los espacios. Los materiales serán pisos de mármol, estanterías de madera, y el revestimiento exterior de acero galvanizado.

Fig. 5.36 Concepto de la propuesta. (Imagen propia)

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

PLANTA

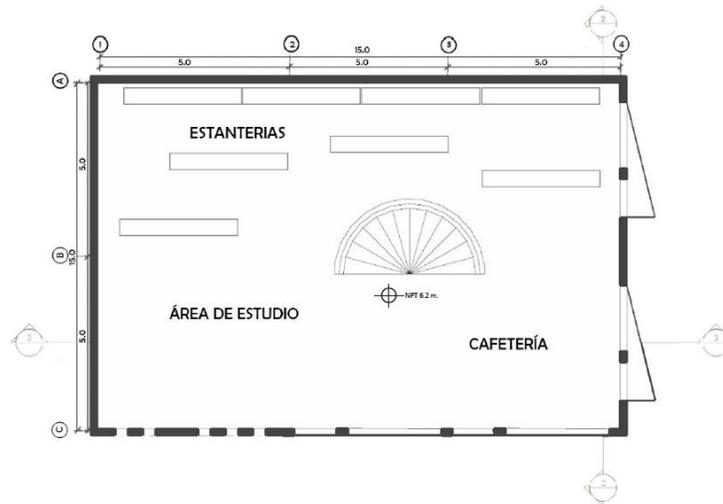
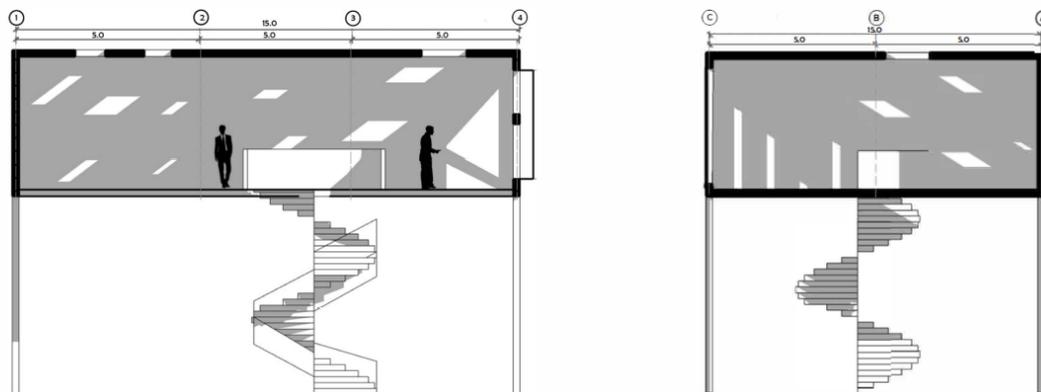


Fig. 5.37 Planta Arquitectónica. (Imagen propia)

CORTES



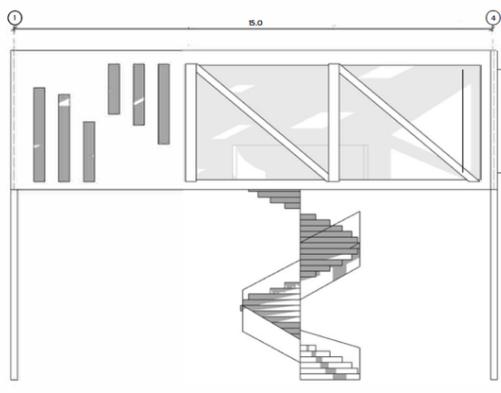
CORTE LONGITUDINAL

CORTE TRANSVERSAL

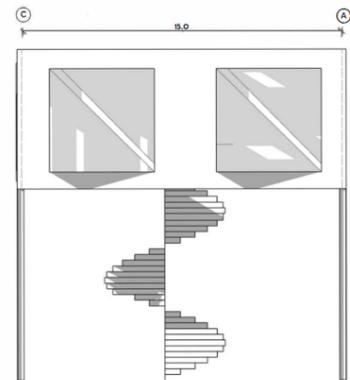
5.38 Corte longitudinal y transversal. (Imagen propia)

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

FACHADAS



FACHADA LONGITUDINAL



FACHADA TRANSVERSAL

Fig. 5.39 Fachadas (Imagen propia)

VISTAS

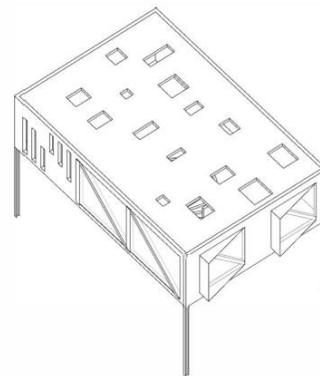


Fig. 5.40 Renders y vista (Imagen propia)

SOLUCIÓN ESTRUCTURAL

La solución estructural se basa en el diseño de la estructura del edificio previamente analizado. Los elementos estructurales que se toman en cuenta son columnas, armadura perimetral y vigas secundarias.



Fig. 5.41 Solución estructural. (Imagen propia)

Conclusiones del caso de estudio 3.- En este caso, se aprecia que los 3 sistemas no fueron incorporados en la propuesta del alumno para su proyecto de biblioteca. Faltó proponer el sistema de rigidización frente a sismo y viento, que en este caso se trata del núcleo de concreto. La propuesta no es parcialmente viable por la falta de este sistema. El objetivo de las estructuras arquitectónicas es que la estructura se integre y sea viable desde el planteamiento del concepto. En este caso, la forma arquitectónica, junto con las fachadas y la función se verán modificadas al someterse al estudio de las fuerzas horizontales, debido a que hace falta el sistema de rigidización.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Conclusiones del capítulo 5.

La pertinencia de mostrar estos casos de estudio representativos es que en el primer y segundo caso se muestra el proceso de diseño de acuerdo con la teoría de Enrico Tedeschi en donde se incluye la Metodología MOOA y el alumnado logra representar de manera clara la propuesta de las interacciones didácticas en el momento oportuno, creando una composición arquitectónica desde los sistemas estructurales.

En los dos casos se utilizaron análogos diferentes, atendiendo a diferentes taxonomías de Engel.

En el caso tres, se logra seguir todo el proceso de identificación de los sistemas estructurales del caso análogo, pero no se logra la correcta interpretación por lo que la propuesta arquitectónica no es viable desde la óptica estructural.

Estos casos de la aplicación de la teoría permiten realizar la validación de la aplicabilidad y efectividad del modelo MOOA en diferentes contextos educativos y permite realizar conclusiones, aportaciones y recomendaciones.

CONCLUSIONES

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

El objetivo de este trabajo trata la problemática de integrar la estructura y el proyecto arquitectónico desde la composición arquitectónica a través de la clasificación de los sistemas estructurales. Esta situación se abordó desde dos líneas de investigación, la primera desde una metodología MOOA en la enseñanza de las estructuras tanto para estudiantes como para docentes de arquitectura, y la otra desde la identificación y propuesta de las llamadas “Estructuras Arquitectónicas”.

Esta propuesta conceptual se basó en la hipótesis de que, al incorporar desde una fase inicial el estudio de los sistemas estructurales en el proceso del diseño arquitectónico, se contribuirá a crear una propuesta formal de la composición del proyecto desde la concepción de los sistemas estructurales.

Para desarrollar esta teoría, hubo la necesidad de distinguir el sistema constructivo del sistema estructural, lo que resultó en una comprobación de que es imprescindible hacer esta distinción desde un principio y se concluye que la propuesta de incorporar el sistema estructural y no el sistema constructivo es viable. Esto se logró con la metodología de analizar el sistema estructural y constructivo de edificios emblemáticos.

A raíz de que se planteó la base de incorporar el sistema estructural y no el sistema constructivo, se planteó identificar cuál es la clasificación que ayudaría a incorporar en las estructuras arquitectónicas y se visualizó que la clasificación de Heino Engel es la opción que ayuda a la comprensión del funcionamiento de cada sistema y la forma que otorga, por lo que se plantea abrir futuras investigaciones para estudiar cada uno en forma más profunda y precisa.

Para poder implementar la teoría, se desarrolló una metodología llamada MOOA (Metodología de Observación de Objetos e inter-Acción), para desarrollar las estructuras arquitectónicas y aplicarla estudiantes de arquitectura en 3 universidades: Facultad de Arquitectura de la Universidad Privada 1, Escuela de Arquitectura de la Universidad privada 2 y de una Universidad Nacional Pública. Se muestran los trabajos realizados por los alumnos tanto los que llegaron a desarrollar las estructuras arquitectónicas como los que no lograron desarrollarlas, pero lograron la comprensión del sistema estructural.

Los resultados obtenidos durante este trabajo se plantean en dos secciones, la primera sección muestra las conclusiones derivadas de los trabajos que se implementaron con los alumnos y la segunda sección muestra las conclusiones generales del planteamiento de la propuesta de este trabajo y las vertientes que se derivan.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Conclusiones de la implementación de la metodología MOOA.

Al implementar la metodología MOOA con los alumnos de arquitectura se observó que en algunos casos se logró desarrollar las estructuras arquitectónicas, pero en otros casos no se logró.

La primera parte de la metodología se centra en entender cómo funciona el sistema estructural de edificios emblemáticos a través de la clasificación de Heino Engel, en esta etapa los alumnos muestran un gran interés, se manifiestan sorprendidos y entusiastas al comprender conceptos complejos de una manera sencilla. Después de esta etapa se trata de reinterpretar el sistema estudiado y aplicarlo a su proyecto, experimentando diferentes configuraciones. Es en este punto en donde algunos alumnos avanzan a la siguiente etapa logrando incorporar la estructura en el momento apropiado y logrando formas arquitectónicas en donde la estructura otorga la forma, es decir, la intención de la composición integrada a la forma estructural, además de proponer un proyecto arquitectónico materializable.

Los alumnos que no lograron desarrollar las estructuras arquitectónicas son los que no lograron reinterpretar el sistema para adaptarlo a su intención arquitectónica y terminaron cambiando su intención o concepto inicial o simplemente su propuesta resulta inviable desde el punto de vista estructural.

Una conclusión sobre este resultado es que a estos alumnos les hizo falta estudiar más sistemas estructurales de edificios análogos, esto logrará que los alumnos descubran el sistema que mejor se integre y haga posible su intención arquitectónica. ¿Cómo lograr que los alumnos experimenten con más sistemas? Una pregunta que involucra tal vez a la modificación del plan de estudios o al tiempo que se le asigna a la materia o al perfil de egreso.

El plan de estudios 2017 de la Licenciatura de Arquitectura en la Universidad Nacional Autónoma de México, incorpora el estudio de los sistemas estructurales de Heino Engel en la materia de Sistemas Estructurales Básicos I, en el primer semestre, por lo que una propuesta sería implementar esta metodología MOOA, para sistemas de sección activa en segundo semestre, e ir incorporando sistemas de la taxonomía de Heino Engel conforme el alumno vaya avanzando en sus semestres. De tal manera que pueda ir incorporando los criterios estructurales desde una Metodología estructurada.

Otra conclusión es que pocos estudiantes logran acercamiento por la metodología de aprendizaje basado en problemas. Este hallazgo involucra a un tema pedagógico, en donde será necesario estudiar temas didácticos y estudiar a profundidad el perfil del alumno estudiante de arquitectura.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

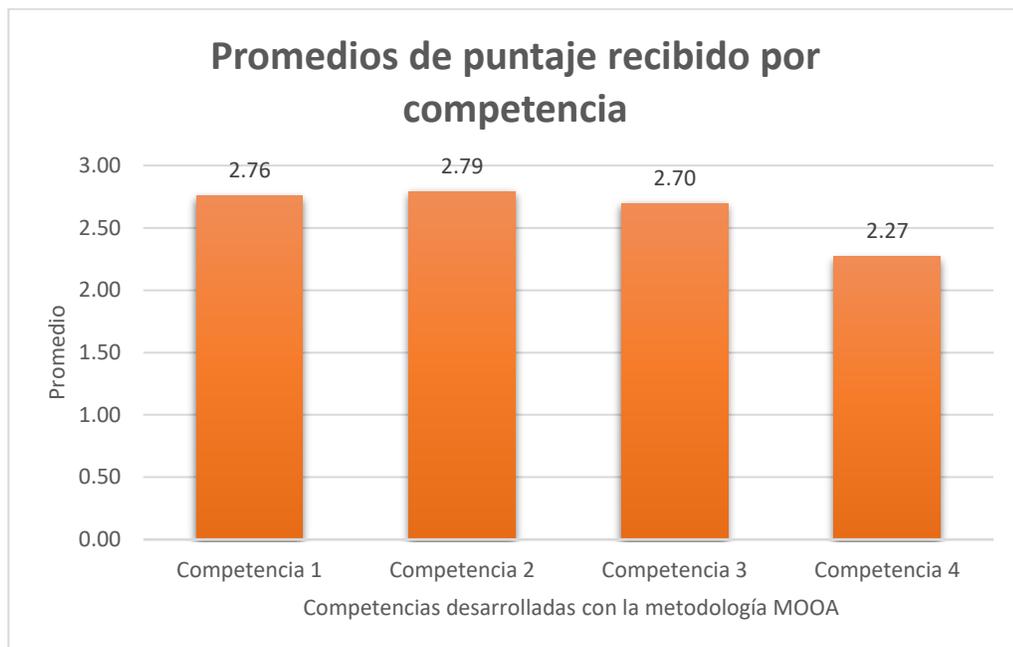
Así mismo, una conclusión acerca del profesor: Cuando se le complica guiar a los alumnos por varias razones, ya sea porque desconoce el sistema estructural del caso de estudio, esto sucede cuando el edificio que se analiza cuenta con poca información, o cuando el profesor desconoce el comportamiento del sistema estructural, o por escasez de tiempo para estudiar el proyecto del alumno debido a que no se acercan con el profesor a realizar asesorías.

Derivado de esta observación se abre una ventana de posibilidades, una de ellas es ampliar el capítulo 4 de casos de estudio en una serie de cuadernillos o videos que explique el sistema estructural y constructivo sobre cada construcción emblemática o incluso sobre los edificios que de manera rápida otorgan una gran cantidad de información para analizar.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Gráfica.

La Metodología MOOA se aplicó a estudiantes de 5º y 6º semestre de 3 universidades ubicadas en la ciudad de México entre los años 2018 y 2023. Se graficaron los resultados de las competencias desarrolladas por los alumnos, evaluadas a través de la rúbrica implementada, en una muestra de 41 equipos (5 a 6 alumnos por equipo) por cada Universidad.



Gráfica 1.1 Promedio de resultados de la metodología MOOA por competencias.

La escala es del 1 al 3, en donde:

- 1 significa que no desarrolló la competencia
- 2 significa que la competencia está en desarrollo
- 3 significa que la competencia se desarrolló suficientemente

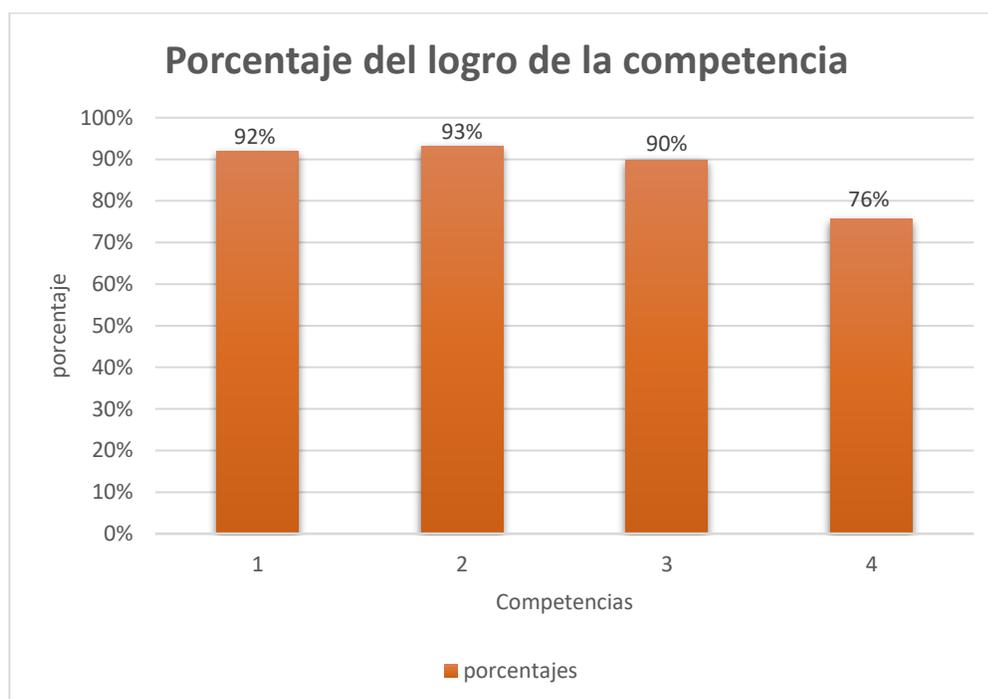
Competencia 1.- Identifica los elementos estructurales y los clasifica de acuerdo con la taxonomía de Engel.

Competencia 2.- Describe las estructuras arquitectónicas y genera interés por identificar su potencial e incluirlas en la composición arquitectónica.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Competencia 3.- El alumno aplica criterios estructurales en la solución del proyecto desde la composición arquitectónica de manera estratégica.

Competencia 4.- Realiza el cálculo para diseñar los elementos estructurales del sistema que resiste por cargas verticales. Incluye los sistemas de control y rigidización que le ayuden a proponer una estructura viable antes cargas de sismo y viento.



Gráfica 1.2 Logro de la competencia en porcentajes

Conclusiones de los resultados gráficos.

- Se observa que el desarrollo de la competencia 1 que corresponde a la identificación y clasificación de sistemas estructurales fue del 92 %.
- La competencia 2 que corresponde a que el alumno describe las estructuras arquitectónicas y genera interés por identificar su potencial e incluirlas en la composición arquitectónica se desarrolló en un 93%.
- La competencia 3 que corresponde a que el alumno aplica criterios estructurales en la solución del proyecto desde la composición arquitectónica de manera estratégica fue del 90%.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

- La competencia 4 que corresponde a que el alumno realiza el cálculo para diseñar los elementos estructurales del sistema que resiste por cargas verticales. Propone los sistemas de control y rigidización que le ayuden a proponer una estructura viable antes cargas de sismo y viento se desarrolló en un 76%.

Se observa que existe una mayor tendencia a comprender el funcionamiento de los sistemas estructurales y una menor tendencia a desarrollar la competencia de calcular los elementos estructurales, sin embargo, aunque la tendencia de generar el cálculo de la estructura es menor, no es insuficiente, sino que se encuentra en desarrollo.

Hay un porcentaje de alumnos que egresarán considerando que la estructura es algo más que un sistema esquelético que soporta y transmite cargas. Tal vez en algún momento, estos alumnos sean profesores de estructuras en arquitectura y continúen con la transmisión de la enseñanza de las estructuras desde el planteamiento de la composición arquitectónica o dar un paso más allá para mejorar la metodología apoyándose en la Inteligencia artificial.

Conclusiones generales.

¿Cómo y hasta dónde enseñar la materia de Estructuras a los alumnos que estudian la carrera de Arquitectura? En este trabajo se concluye que una modificación al plan de estudios requiere de incorporar el estudio de los sistemas estructurales y su interpretación con el propio proyecto arquitectónico. La mera transmisión de métodos de cálculo para específicos sistemas de sección activa de concreto y acero, es insuficiente para otorgarle herramientas al alumno en este siglo XXI.

Por un lado, se reconoce la importancia de conocer y dominar los diferentes métodos de cálculo que involucran al diseño arquitectónico, y por el otro se reconoce que el arquitecto no es ingeniero y no debería calcular.

Se conoce que el origen del dilema se encuentra en el cisma ocurrido entre Tecnología y Arquitectura y en el desarrollo de softwares que permiten un cálculo más sofisticado para lograr formas más complejas en el diseño arquitectónico.

Los métodos de cálculo antes de la revolución industrial eran sencillos y del conocimiento del arquitecto y constructor. Esta simplificación en el cálculo permite que el Arquitecto y el constructor tengan control sobre el proyecto en su totalidad.

Las computadoras que han permitido que los trabajos teóricos del XIX fuesen aplicados con facilidad a complejas estructuras, abrió una potencia de cálculo insospechada hasta entonces. Paralelamente al desarrollo de las computadoras, el método de los elementos

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

finitos ha sido la gran aportación en métodos numéricos de cálculo en el siglo XX, y permite en este momento abordar el cálculo de cualquier estructura y material con una precisión suficiente. Pero no se incorporó esta ciencia a los planes de estudio de las carreras de Arquitectura, entonces ¿Cómo va a abordar el estudiante los problemas de estructuras irregulares, si solo tiene herramientas para abordar estructuras regulares y limitadas?

Es en este momento del proceso de cálculo, que surge el cisma entre arquitectura y estructuras.

El arquitecto ya no tiene en su formación los elementos para hacer frente a los métodos de cálculo de métodos finitos y dinámicos.

El cálculo estructural tiende cada vez más a una especialización de especialización. Se requiere de un especialista en estructuras que a su vez sea especialista en estructuras de concreto, estructuras de pretensados, de edificios de gran altura, de estructuras de acero, de madera, de sistemas innovadores, de diseño por sismo dinámico no lineal y ahora en el año 2023 del diseño estructural basado en resiliencia. Esta tendencia de especialización es imposible incorporarla a los planes de estudio de la carrera de arquitectura.

Siendo entonces que, el plan de estudios de la carrera de arquitectura tiene un dilema por delante que resolver, o integra por completo el estudio de los sistemas de cálculo para dar herramientas o implementa materias que ayuden al alumno a comprender cómo funcionan las estructuras y cómo las puede incorporar en su proyecto arquitectónico para darle herramientas viables.

Por lo que una conclusión de este trabajo es que, desde el estudio de los sistemas estructurales, su funcionamiento y comprensión y no desde su cálculo, se otorguen las herramientas y sean un elemento clave para darle al estudiante de arquitectura elementos para un planteamiento lógico estructural a su proyecto arquitectónico. De esta manera el arquitecto retoma el control de su proyecto desde un ángulo del diseño y no desde el cálculo que cada vez es más complejo.

Se concluye también, que derivado del estudio de los sistemas estructurales y su incorporación en el proceso de la composición arquitectónica a través de la metodología MOOA, se abre una ventana nueva de investigación sobre los diferentes sistemas estructurales. Es decir, investigar con este enfoque cada uno de los sistemas estructurales, su funcionamiento y su reinterpretación desde la academia, este estudio permitirá abrir otros campos de estudio como puede ser desde la inteligencia artificial, porque si se provee al sistema de la información necesaria como la idea principal del concepto arquitectónico, el sistema puede hacer la etapa de experimentación y crear la composición integrando el concepto con la estructura.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Se vislumbran varias posibilidades al estudiar los sistemas estructurales, lo que puede derivar en propuestas nuevas e inimaginables para nuestro inicio del siglo XXI. Así como nuestros ancestros del gótico no imaginaban que pudiera existir un Gaudí o un Candela que propusieran sistemas de catenarias y paraboloides, los alumnos de arquitectura de hoy podrían ser los futuros generadores de sistemas estructurales más eficientes y en sintonía con el ritmo del mundo actual, dirigido a hacer más sustentables las estructuras de la mano de los sistemas constructivos.

APORTACIONES DE LA TESIS.

Este trabajo aporta una Metodología llamada MOOA (Metodología de observación del objeto y su interacción). La cual se desarrolló a partir del estudio del modelo pedagógico de las interacciones didácticas. Esta metodología permite que el estudiante de la licenciatura de arquitectura observe e interactúe con los diferentes sistemas estructurales para saber cuál de ellos hace posible su intención en el proyecto arquitectónico.

Aporta también un nuevo campo de conocimiento llamado Estructuras Arquitectónicas, que se refiere al estudio de los sistemas estructurales como precursor al desarrollo del proyecto arquitectónico, debido a que el estudio y la interpretación de cada sistema estructural otorga nuevas formas arquitectónicas, pero además deja las bases para que cada sistema estructural sea estudiado a profundidad desde diferentes materialidades. Se rescata el planteamiento que en 1967 hace Heino Engel sobre la clasificación de los sistemas estructurales, otorgándole un lenguaje más comprensible para el estudiantado y el profesorado, para que pueda ser abordado de manera creativa. En esta tesis se hace énfasis en los sistemas de sección y vector activos, sin embargo, la metodología MOOA se queda como plataforma para poder abordar los otros sistemas estructurales de Forma activa, Superficie Activa y Altura Activa.

Aporta también una diferente pedagogía al abordar las materias de sistemas estructurales, debido a que el profesor y el alumno toda vez que se entendió el funcionamiento del sistema estructural, pueden hacer una reinterpretación de este, y darle mayor sentido a los cálculos que muchas veces no tienen una aplicación en el proyecto.

En la actualidad existe una constante búsqueda a nivel mundial de nuevas pedagogías para mejorar los sistemas de enseñanza-aprendizaje y este trabajo aporta una nueva investigación a acerca de las interacciones didácticas.

Otra aportación de este trabajo es el planteamiento de 3 casos de estudio que fueron desarrollados por alumnos de distintas universidades, lo que permite visualizar la falta de

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

información sobre las edificaciones en cuanto a su sistema estructural, lo que abre un nuevo campo de estudio: rescatar, estudiar y documentar los sistemas estructurales de las edificaciones nuevas y existentes.

Otra aportación es la importancia de incorporar el estudio de los sistemas estructurales en los planes de estudio, de esta manera se brinda al estudiantado herramientas para enfrentarse a las estructuras irregulares del siglo XXI y proponerlas de una forma viable en su proyecto arquitectónico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

- Aldinger, IL. (2016) Frei Otto: Heritage and Prospect. International Journal of Space Structures. 2016;31(1):3-8. doi:10.1177/0266351116649079
- Ambros, James. (2005). Análisis y diseño de estructuras. Ed Limusa.
- Archundia-Aranda, Hans Israel & Fernández-Sola, Luciano & Guerrero, Héctor & Peña, Fernando. (2018). Efecto de los sismos de septiembre de 2017. Tomado de [https://www.researchgate.net/publication/329156344 Efecto de los sismos de septiembre de 2017/citation/download](https://www.researchgate.net/publication/329156344_Efecto_de_los_sismos_de_septiembre_de_2017/citation/download)
- López, Avellaneda, Fabrisio, Omar. (2020). Diseño paramétrico de las estructuras desplegadas: control límite de Movimiento. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament de Tecnologia de l'Arquitectura. <http://hdl.handle.net/10803/669320>
- Balmond, C., Koolhaas, R. (2008). Serpentine Gallery Pavilion 2006: Rem Koolhaas and Cecil Balmond with Arup. Alemania: Serpentine Gallery.
- Barba, Juan José. (2018) Pabellón Para La Serpentine Gallery 2006 Por Rem Koolhaas Y Cecil Balmond. <https://www.metalocus.es/es/noticias/pabellon-para-la-serpentine-gallery-2006-por-rem-koolhaas-y-cecil-balmond>
- Basterra, Otero, A. (1998). Las estructuras arquitectónicas de Félix Candela: una revisión actual. Departamento de Edificación. Universidad de Valladolid. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Departamento de Edificación. Universidad de Valladolid. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Pág. 143.
- Belogolovsky, Vladimir. (2021). Cecil Balmond insists on trying to break the formality of any order and regularity. <https://www.stirworld.com/think-columns-cecil-balmond-insists-on-trying-to-break-the-formality-of-any-order-and-regularity>
- Bernabeu Larena, Alejandro (2017). Estrategias de diseño estructural en la arquitectura contemporánea, El trabajo de Cecil Balmond. Tesis Doctoral. Departamento de Estructuras de Edificación Escuela Técnica Superior de Arquitectura Universidad Politécnica de Madrid. https://oa.upm.es/910/1/Alejandro_Bernabeu_Larena.pdf
- Bojórquez, Edén. (2009) Revista de Ingeniería Sísmica No 81. 53-79 1.- Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Sinaloa.
- Carmona Y Pardo, M (2021) introducción A Los Sistemas Estructurales Resistencia De Materiales. Editorial Trillas.
- Cervera, Miguel & Blanco, Elena, (2014). Mecánica de estructuras. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE). <http://cervera.rmee.upc.edu/libros/Mecánica%20de%20Estructuras.pdf>

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

- CFE, (2015). Manual de Diseño de Obras Civiles, Capítulo C.1.3 Diseño por Sismo". Comisión Federal de Electricidad, México.
- Charleson, Andrew. (2007) La estructura como arquitectura. Ed. Reverté. Estudios Universitarios de Arquitectura.
- Cho, J., Lomiento, G., Ghada, G.M., Terstegen, K. (2020). Architecture, engineering, and construction interdisciplinary senior interdisciplinary project educational model (Conference Paper). 126th ASEE Annual Conference and Exposition: Charged Up for the Next 125 Years, ASEE 2019; Tampa Convention Center Tampa; United States; 15 June 2019 through 19 June 2019; Code 157034.
- Collins, Peter (1970). Los ideales de la Arquitectura moderna. Gustavo Gili, Barcelona.
- Cubillos, Alfonso. (2008). Introducción al Método de los Elementos Finitos. Recuperado de <https://almec.wordpress.com/2007/08/01/introduccion-al-metodo-de-los-elementos-finitos/>
- Cubillos Vanegas, Sonia Ivonne. (2021) Enseñanza de construcción de estructuras para arquitectos mediante simulación 3D. Colombia. <https://doi.org/10.5377/arquitectura.v6i11.11831>
- Díaz Barreiro y Saavedra (2012). Las competencias en arquitectura, una solución o una ilusión. <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://biblat.unam.mx/hevila/Planeacionyevaluacioneducativa/2012/vol19/no55/2.pdf>
- Engel, Heino. (2018) Sistemas de Estructuras. Ed. Gustavo Gili S.A. Ed. 2ª ed., 3ª tirada.
- Engel, Heino. (1964). The Japanese House: A Tradition for Contemporary Architecture.
- Engel, Heino. (1985). Measure and Construction of the Japanese House.
- Erazo, Juan. (2022). Enrique Ciriani y la Escuela de París (Grupo Uno): entre la pedagogía y la práctica Universitat Politècnica de Catalunya. Departament de Projectes Arquitectònics. Programa de doctorado <http://hdl.handle.net/10803/674246>.
- Fuentealba, Quilodrán, J., Reyes Núñez, M., & Schmidt Gómez, D. (2017). Desempeños del estudiante de Arquitectura. Una experiencia de investigación en la Universidad del Bío-Bío. Arquitectura y Urbanismo, XXXVIII (2),31-42. [fecha de Consulta 6 de Julio de 2023]. ISSN: 0258-591X. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=376852683003>

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

- Galloway, D Thomas. (2001). Inside | Outside. The Architecture of TVS. Edizione Press. New York, United States of America.
- Godoy, Jesús. (1991) Forma y Composición en Arquitectura. Universidad Politécnica de Cataluña. España.
- Gómez, Raúl. (1979) Diseño Estructural simplificado. Facultad de Arquitectura de la Universidad de Guadalajara. 409.
- González, Norma. (2008) Intersticios entre la ingeniería civil y la arquitectura, aproximación a una teoría de la habitabilidad para la ingeniería civil. Tesis de Maestría en Arquitectura. UNAM.
- González, Norma. (2023). Estructuras Arquitectónicas. Blog. www.norma.gonzalezunam.blogspot.mx
- Guzmán X, Hernández A, San Martín I, (2010) Fernando López Carmona, Arquitecto. 50 años de enseñanza. Colección Arquitectura. UNAM, Ciudad de México.
- Hernández, Agustín., & Trujillo, M. (2016). Metodología para determinar esfuerzos de diseño del bambú. Academia XXII, 7(13). <https://doi.org/10.22201/fa.2007252Xp.2016.13.56297>
- Hobson, Benito. (2015). El Pabellón Serpentine Gallery de 2005 de Siza y Souto de Moura fue "enormemente complicado". Revista DeZeen. <https://www.dezeen.com/2015/11/29/video-interview-alvaro-siza-eduardo-souto-de-moura-2005-serpentine-gallery-pavilion-julia-peyton-jones-movie/>
- Hüseyin, İlgin, Bekir, Ay & Mehmet, Gunel (2021) Un estudio sobre las principales consideraciones arquitectónicas y de diseño estructural de los edificios súper altos contemporáneos, Revisión de la ciencia arquitectónica, 64:3, 212-224, DOI: 10.1080/00038628.2020. (PDF) Un estudio sobre las principales consideraciones arquitectónicas y de diseño estructural de los edificios superaltos contemporáneos. Available from: https://www.researchgate.net/publication/340832411_A_study_on_main_architectural_and_structural_design_considerations_of_contemporary_supertall_buildings#fullTextFileContent [accessed Jul 06, 2023]
- Krawinkler, H y A Nassar (1992), "Seismic design based on ductility and cumulative damage demands and capacities", Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings (Editors: H. Krawinkler and P. Fajfar), Elsevier Applied Science, U.K., pp. 95104.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

- Khodadadi, Anahita, "Basic Concepts of Structural Design for Architecture Students" (2022). PDXOpen: Open Educational Resources. 37. <https://pdxscholar.library.pdx.edu/pdxopen/3710.15760/pdxopen-31>.
- López, Carmona, F., & Hernández Hernández, A. (2011). Recuperación geométrica de la Catedral y el Sagrario Metropolitanos. *Bitácora Arquitectura*, (5), 32–37. <https://doi.org/10.22201/fa.14058901p.2001.5.33761>
- Lyall, Sutherland. (2002). *Maestros de la Estructura. La ingeniería en las edificaciones innovadoras*. Editorial BLUME. Barcelona.
- Lyten, Laurens, (2012). *Structurally Informed Architectural Design Proposals for a Creative Collaboration between Architect and Structural Engineer*. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy. Department of Architecture Chalmers University of technology Gothenburg, Sweden. [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://core.ac.uk/download/pdf/70596763.pdf](https://core.ac.uk/download/pdf/70596763.pdf).
- Luyten, L., (2010). Architect and structural engineer communicating in multidisciplinary creativity. In P. Cruz, ed. *Proceedings of first International Conference on Structures and Architecture*. Guimarães, 21-23 July 2010. Leiden: CRC Press/Balkema, pp. 1793–1800.
- Luyten, L., (2009). Architecture students as part of an interdisciplinary design team. In C. Spiridonidis & M. Voyatzaki, eds. *Architectural Design and Construction Education, Experimentation towards Integration*. Genoa, 11-13 June 2009. Thessaloniki: Art Of Text, pp. 491–497. Luyten, L., 2009b. Communication between architect and engineer in a creative environment. In J. Verbeke & A. Jakimowicz, eds. *Communicating (by) Design*. Brussels, 15-17 April 2009. Göteborg, Brussels: Chalmers & Sint-Lucas, pp. 581–590.
- Meli, Roberto. (2010) *Revista Digital Universitaria*. • Volumen 11 Número 1 • ISSN: 1067-6079. Coordinación de Publicaciones Digitales. DGSCA-UNAM.
- Meli, Roberto (1994): *Diseño estructural de albañilería edificios: La práctica mexicana*. ACI especial publicación 147 albañilería en las Américas, American Concrete Institute, 239- 62.
- Mendoza, L. (2020). Lo que la pandemia nos enseñó sobre la educación a distancia. *Revista Latinoamericana De Estudios Educativos*, 50(ESPECIAL), 343-352. <https://doi.org/10.48102/rlee.2020.50.ESPECIAL.119>
- Macdonald, Angus J (2019). *Structure and Architecture*. 3rd Edición, editorial Routledge.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

- Miranda, Freddy. (2014). "Arquitectura y tecnología: tipología e innovación como formas disciplinares análogas de la modernidad arquitectónica y técnica". (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/>
- Miranda, Freddy. (2002). "Arquitectura y técnica: una interpretación de la relación entre tecnología y el movimiento moderno". Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/98699>
- Moehle, J P (1992), "Displacement based design of reinforced concrete structures subjected to earthquakes", Earthquake Spectra, Vol. 8, Nº 3, pp. 403-428.
- Noriega, Ernesto. (2007). "Estructuras ligeras: metodologías para el diseño de estructuras a través del trazo con geometría descriptiva y modelos físicos experimentales". (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Coordinación General de Estudios de Posgrado, UNAM. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/3500059>.
- Norma Técnicas Complementarias para diseño por sismo con comentarios. (2020). Gaceta oficial de la Ciudad de México.
- Normas Técnicas Complementarias sobre criterios y Acciones para el diseño Estructural de las Edificaciones. (2017). Gaceta oficial de la Ciudad de México.
- Oliva, Gerardo., (2007). Ulrich Müther (1934-2007). El maestro constructor de la provincia de Rügen. Anales del Instituto de Investigaciones Estéticas, XXIX (90),273-284. [fecha de Consulta 4 de Julio de 2023]. ISSN: 0185-1276. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=36909013>
- Olsen C, Mac Namara S. (2022). Collaborations in Architecture and Engineering. Taylor & Francis, 2ª Edición. https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=eqxVEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT7&dq=research+about+architecture+and+engineering&ots=l2MEKr8GYb&sig=bZPUjqkZ07zXDEwXUb_dgOEbw28#v=onepage&q&f=false
- Páez, Tatiana (2015). Reseña sobre la enseñanza de las estructuras: base para una metodología de aprendizaje. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Cuenca (Ecuador).
- Palacio de Minería, (2019), ¿Sabías que el Palacio de Minería fue el primer inmueble de la UNAM en estrenar una cubierta velaria? [Tweet] <https://twitter.com/PalacioMineria/status/1174752249660223496/photo/1>

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

- Pelli, C. (2000) Observaciones sobre la arquitectura. Ed. Infinito. Buenos Aires.
- Perugini, P., Andreani, Stefano. (2013). Pier Luigi Nervi's Columns: Flow of lines and forces. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*. 54. 137-148.
- Pier Luigi Nervi, (1955) *Architect and Building News*, volúmen 208.
- Priestley, M. J. N. (1998), "Brief Comments on Elastic Flexibility of Reinforced Concrete Frames and Significance to Seismic Design", *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 31(4): 246-258
- Puig-Pey, Ana. (2009). El Arquitecto: Formación, Competencias y Ejercicio Profesional. Tesis Maestría. Departament d'Organització d'Empreses Universitat Politècnica de Catalunya. <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/403760/TAMP-PC1de1.pdf?sequence=1>
- Romeu, Adoración. (2002). "Didáctica de la arquitectura: la enseñanza individualizada de la proyección arquitectónica". (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/82475>.
- Ruiz-Jaramillo, J. y Vargas-Yáñez, A. (2018). La enseñanza de las estructuras en el Grado de Arquitectura. Metodología e innovación docente a través de las TIC | Teaching structures on Architecture degrees. ICT-based methodology and teaching innovation. *Revista Española de Pedagogía*, 76 (270), 353-372. doi: <https://doi.org/10.22550/REP76-2-2018-08>
- Ruiz, (2014), Dicotomía entre Ruskin y Viollet-Le-Duc. <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/25393/1/2-DictonomiaRuskinLeDuc.pdf>
- Sol, Jimeno. (2018) Experimento y simulación en el trabajo de Frei Otto, Heinz Isler y Antonio Gaudí Universidad Politécnica de Madrid. Trabajo de fin de Carrera. <https://oa.upm.es/53849/>
- Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño. (2017). Gobierno de la Ciudad de México, México.
- T.Y Lin. San Francisco California. (1991) Sydney D Stoesbury. Colegio de arquitectos y Diseño. Universidad Estatal de Kansas. Manhattan. Ed. Limusa
- Terán, A., Zuñiga Cuevas, O., y Ruiz García, J. (2009). -Based Seismic Assesment of Low-Heogh Confined -Masonry Buildings". *Earthquake Spectra*, 25(2), 439 464.
- Tobón, Sergio, (2013) Formación integral y competencias. Pensamiento complejo, currículo, didáctica y evaluación (Bogotá: Ecoe Ediciones), 285.

ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

- Torroja, Eduardo. (2004). Consejo superior de Investigaciones científicas. Instituto de Ciencias de la construcción “Eduardo Torroja”. Madrid.
- Vázquez, Mariano. (1997) Sobre la enseñanza y práctica de la teoría de estructuras. Dpto. de Estructuras de Edificación. Univ. Politécnica de Madrid. Revista: Informes de la Construcción, Vol. 49, n° 449, mayo/junio. Recuperado de: <https://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/956/1038>
- Villafuerte, P. (2020). Educación en tiempos de pandemia: COVID-19 y equidad en el aprendizaje. Observatorio de Innovación Educativa, Tecnológico de Monterrey. Recuperado de <https://observatorio.tec.mx/edu-news/educacion-en-tiempos-de-pandemia-covid19>.
- Yáñez, Carlos. (2015) Frei Otto a través de los ojos de J. Gerardo Oliva. http://arquitectura.unam.mx/uploads/8/1/1/0/8110907/abril_20052015.pdf