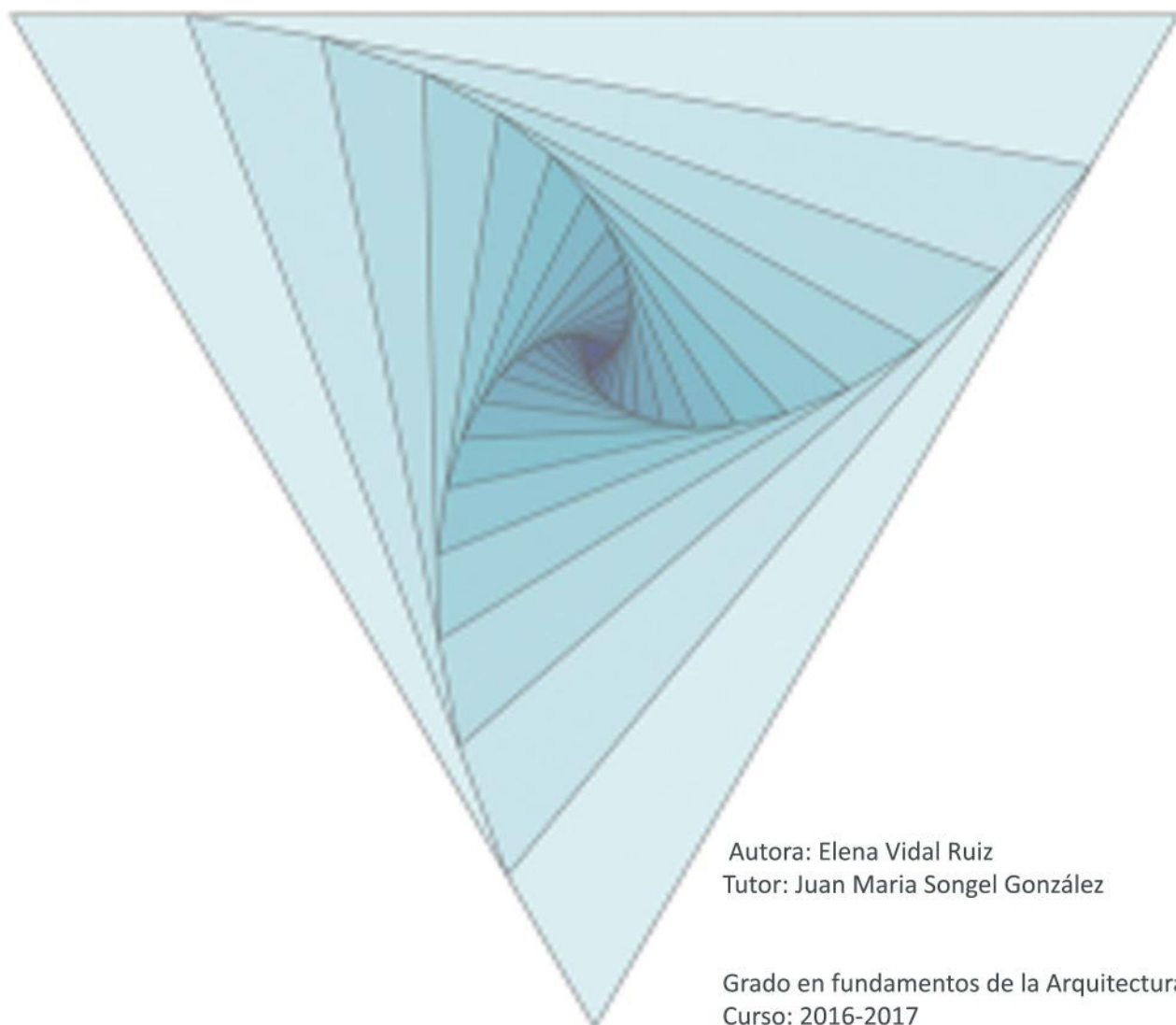




UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

TRABAJO FINAL DE GRADO:

LA RELACIÓN ENTRE FORMA Y ESTRUCTURA EN  
LA ARQUITECTURA Y EN LA INGENIERÍA CIVIL.  
FREI OTTO Y EMILIO PÉREZ PIÑERO



Autora: Elena Vidal Ruiz  
Tutor: Juan Maria Songel González

Grado en fundamentos de la Arquitectura  
Curso: 2016-2017

## RESUMEN

La arquitectura ligera es el punto de partida del trabajo de investigación realizado, pues en la actualidad el campo de aplicación de este tipo de estructuras es bastante amplio. El objeto de este trabajo final de grado es investigar y analizar sobre la arquitectura ligera y las características de ella. La relación de las obras de Frei Otto y Emilio Pérez Piñero, es la que hace indagar en el tema en cuestión, en los conceptos de formas naturales y la importancia de la forma al componer una estructura. El análisis realizado se centra en la geometría y en la relación de esta con la naturaleza, además indaga en los procesos naturales que llevan a ella. Además, la investigación concluye con la realización propia de un modelo estructural simple, en el que se observa la relación directa de los conceptos estudiados. Para llevar a cabo la investigación se ha realizado una revisión bibliográfica de artículos y libros, las bases de datos utilizadas son tanto electrónicas como en papel. La investigación sobre los conceptos clave y el posterior análisis de las obras permiten determinar las recomendaciones para conseguir una estructura ligera, sostenible y eficaz.

## RESUM

El punt de partida d'aquesta investigació es la arquitectura lleugera, en la actualitat el camp de aplicació d'aquest tipus de estructures es ampli. El objete d'aquest treball de fi de grau és investigar i analitzar la arquitectura lleugera i les seues característiques. La relació de les obres de Frei Otto i de Emilio Pérez Piñero, és la que fa indagar en el tema en qüestió, en els conceptes de formes naturals i la importància de la forma al compondré la estructura. El anàlisi es centra en la geometria i en la relació d'aquesta amb la natura, a més examina els processos naturals que porten a ella. A més, la investigació finalitza amb la propia realització de un model estructural simple, en el qual es pot observar la relació directa entre els conceptes estudiats. Per a dur a terme la investigació se ha realitzat una recerca bibliogràfica de articles i llibres, les bases de dades utilitzades són tant electròniques com en paper. La investigació sobre les paraules Clau i el posterior anàlisi de les obres permeten determinar les recomanacions per a conseguir una estructura lleugera, sostenible i eficaç.

## ABSTRACT

Lightweight Architecture is the starting point of this research, nowadays this scope is broad. The objective is perform, reserach and analysis about lightweight architecture and its characteristics. The relation of the works of Frei Otto and Emilio Pérez Piñero, is what makes delve into the subject matter, the concepts of natural forms and the importance of how to compose a structure. The analysis focuses on geometry and its relation with the nature, also the research investigates in natural process. In addition, the research concludes with the self-realization of a simple structural model, in which the direct relation of the concepts studied is observed. A bibliographical investigation of articles and books has been carried out and the databases used are both electronic and paper. The research on the key concepts and the analysis of the works allow to determine the recommendations for a light, sustainable and effective structure.

Palabras clave: *Tejidos pretensados, Forma, Procesos naturales, Estructuras de forma activa, Membrana.*

Paraules Clau: *Teixits pretesats, Forma, procesos naturales, Estructures de forma activa, Membranes.*

Key words: *Prestessed Fabric, Form, Natural processes, Active structures, Membrane.*

# \_ÍNDICE

## INTRODUCCIÓN

1.Introducción	5
2.Estado de la cuestión	7
3.Metodología	9
4.Objetivos	11

## Capítulo I: CONCEPTO DE FORMA Y DE ESTRUCTURA

I_ Concepto de forma y de estructura	13
I.1_ Relación forma y estructura	16
I.2_ Procesos naturales de generación de la forma	19
I.3_ Relación masa, forma y estructura	21
I.4_ Sostenibilidad y eficiencia	23
I.5_ Hitos de la arquitectura ligera	25

## Capítulo II: ANÁLISIS DE OBRAS 28

II_ Análisis de obras	29
II.1.1_ Arquitectura de Frei Otto	30
II.1.2_ Arquitectura de Emilio Pérez Piñero	31
II.2.1_ Cúpula de Essen	32
II.2.2_ Teatro transportable	35
II.2.3_ Relación entre obras	38
II.3.1_ Pabellón japonés Expo2000	41
II.3.2_ Velódromo de Anoeta	44
II.3.3_ Relación entre obras	47

**Capítulo III: PROYECTO EXPERIMENTAL**

III.1_ Consideraciones previas	52
III.2_ Proceso constructivo	54
III.3_ Relación con los referentes	57

**Capítulo IV: CONCLUSIONES**

IV.1_ Conclusión de la investigación	59
IV.2_ Conclusión de las obras analizadas	60
IV.3_ Conclusión del proyecto experimental	61

<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	62
-----------------------------------	----

## INTRODUCCIÓN

El siguiente trabajo final de grado trata de la arquitectura ligera en la que la forma y estructura son el punto de partida del proyecto. Desde mitad del siglo XX este tipo de arquitectura ha ido cogiendo cada vez más fuerza y más importancia en la construcción. Actualmente las estructuras ligeras se utilizan cada vez con más frecuencia.

La elección de este tema no fue bajo demanda, si no como respuesta a la propuesta de Juan Maria Songel “Relación entre forma y estructura en la arquitectura y en la ingeniería civil”. Se decidió reflexionar sobre este tema por el interés que despiertan las formas de los edificios y de los objetos; si han sido pensadas, han sido establecidas sin criterios o han surgido mientras se desarrolla el proyecto. A nivel de proyecto, la forma es una característica que ha surgido de las necesidades del proyecto, de la relación con el entorno, es decir, proyectar de dentro hacia afuera. En la primera reunión con mi tutor me habló sobre los diferentes caminos que podía tomar para desarrollar mi trabajo. El interés de ambos por el análisis de las formas y la creación de nuevos cuerpos que trabajasen a tracción adaptando sus superficies a un área mínima, fue lo que me impulsó a investigar más sobre el tema.

En una primera profundización en el tema, se estableció una clara relación entre Frei Otto y la arquitectura ligera, pues a este se le considera precursor de este campo de investigación en el mundo de la ingeniería y construcción. Tras investigar sobre sus obras y el campo tan amplio en el que trabajó se consiguió establecer la relación buscada entre la forma exterior de un objeto, en este caso edificaciones, y la estructura final capaz de resistir las cargas del modo más eficiente posible. Una segunda aproximación al tema fue la exposición de Emilio Pérez Piñero, la cual llevó a implantar una relación indirecta con el primer arquitecto. A simple vista parecen construcciones totalmente ajenas, pero la ligereza es el hilo conductor de sus arquitecturas. ¿Qué tienen en común las obras de Frei Otto y las de Emilio Pérez Piñero? La respuesta a esta pregunta es la que hace indagar en el mundo de la arquitectura ligera, en el mundo de las formas y en la importancia de la forma cuando se habla de estructura.

La arquitectura ligera, característica en común de estos arquitectos, es el punto de partida de este trabajo, pues en ella se puede observar de manera evidente la relación entre la forma y la estructura. Esta relación es el elemento clave de análisis tanto teórico como práctico que posteriormente servirá para estudiar de forma práctica y experimental la naturaleza de las formas. Estos experimentos reproducen las teorías estudiadas por otros arquitectos y ayudan a comprender las estructuras como elementos naturales. Son el resultado de estudios experimentales que ya se han realizado con anterioridad y han demostrado formas y estructuras que a nivel matemático son complejos y difíciles de determinar.

El tema a estudiar tiene como punto de partida la necesidad de crear construcciones capaces de cumplir sus funciones con la menor cantidad posible de material, que su geometría sea clara, que aporte ligereza al conjunto y facilidad de montaje y transporte. Estas construcciones adaptables e innovadores son las que más se adaptan a las necesidades de la época en la que vivimos. Pues se buscan espacios cambiantes y capaces de adaptarse a distintos usos y funciones. Las nuevas tecnologías, el avance en los materiales y en las técnicas de construcción ayudan a que la arquitectura ligera este en auge.

Además, el campo de aplicación de las construcciones ligeras y eficientes cada vez es más amplio, dado que se buscan espacios de gran tamaño capaces de adoptar diversas funciones sin necesidad de cambiar la estructura del lugar. La importancia de pabellones muy diáfanos en los que la estructura sea capaz de cubrir grandes espacios con la menor cantidad posible de material. Pues nos encontramos en una etapa en la que la importancia por el medio ambiente y la relación con el entorno son puntos clave en el diseño arquitectónico y urbanístico. En la actualidad se premia el ahorro energético y económico y este es otro punto clave que se ha tenido en cuenta para la elección de los arquitectos y sus obras a analizar.

Para finalizar, destacar la importancia de esta cuestión a lo largo de la historia, pues muchos arquitectos e ingenieros han estudiado la posibilidad de construir estructuras eficientes. Sus estudios se han apoyado en análisis y experimentos físicos con maquetas. Es por lo que hace de la arquitectura un mundo experimental y pensamientos intuitivos donde aplicar sistemas analíticos y científicos. En la actualidad se ha empezado a recuperar el interés por la arquitectura experimental y por la innovación, esto ha llevado a la investigación de la historia de la arquitectura experimental y de los inicios en el avance tecnológico.

## ESTADO DE LA CUESTIÓN

Durante la realización de este trabajo se han encontrado diversos estudios, artículos, tesis y revisiones del tema a estudiar. El campo de análisis es muy amplio, pues para indagar sobre la relación entre la forma y la estructura es necesario investigar y analizar otros campos como es el estudio de la naturaleza, de los materiales, además se deben de entender y profundizar los términos de sostenibilidad y eficiencia en el mundo de la construcción.

Las teorías que se han utilizado para abordar el tema de la forma y estructura en el ámbito de la arquitectura y de la ingeniería son las desarrolladas por Antonio Gaudí, Richard Buckminster Fuller y Frei Otto. Teorías en las que explican detalladamente la concepción de la forma y su estructura. Estas revisiones son las que ayudan a comprender la parte más teórica del trabajo. Los libros de Frei Otto IL22 y IL23, aportan el tipo y la importancia de las formas en el espacio, además de explicar la relación de estas con la naturaleza y el desarrollo de estas en el mundo de la construcción y de las estructuras. El libro IL25, ofrece la relación de las formas con la experimentación y detalla los procesos por los que conseguir determinadas formas a partir de distintos ensayos. Para el capítulo I, o parte teórica del trabajo también se han utilizado las teorías de Antonio Gaudí, en las que se muestra la relación de las catenarias y estructuras funiculares en su arquitectura y los procesos para llegar a ellos.

Los apuntes de estructuras de Luisa Basset Salom sobre estructuras laminares, redes de cables y tensoestructuras, han servido para poder transmitir y relacionar estos conceptos en la parte de análisis de obras y para poder solucionar los problemas que han surgido en el proyecto experimental. Además, para conocer la forma de trabajo de estas estructuras y los esquemas de fuerzas que proporcionan las formas finales de los proyectos.

Para poder investigar y analizar las obras elegidas de Frei Otto se han utilizado tanto artículos, como libros como tesis doctorales. Por una parte, el libro *Complete Works* proporciona una descripción general sobre la arquitectura y la teoría de Frei Otto y descripciones cortas de cada una de sus obras. El libro *Frei Otto a life of research construction and inspiration* muestra una relación entre toda su obra y los temas de ecologismo, sostenibilidad y su relación con las ciudades modernas. Por último, el libro *Frei Otto: Estructuras* ofrece con mayor detalle las primeras obras del autor, la relación entre forma y fuerza y parte de su estudio experimental con maquetas.

Para el análisis de obras de Emilio Pérez Piñero se han utilizado tesis doctorales, entre ellas la de Mónica García Martínez, artículos sobre arquitectura desplegable y otros trabajos de análisis de obras y arquitectura experimental española. De este proyectista no se han encontrado tantos resultados en la búsqueda por su corta obra. El artículo *ARQUITECTURA PLEGABLE PARA UNA DÉCADA PRODIGIOSA La obra de Emilio Pérez Piñero y la arquitectura de los años sesenta* nos facilita las características más significativas de la arquitectura desplegable y de algunas de sus obras y como la importancia de la teoría de R.B Fuller en los proyectos de Emilio Pérez Piñero.

Asimismo, se han visto videos e imágenes sobre maquetas realizadas con jabón y con membranas textiles para observar los procesos naturales de autogeneración de la forma. Se han tomado como ejemplo para el desarrollo del tercer capítulo del trabajo en el que se decide experimentar con membranas textiles, hilos y arcos de alambre. En el video *Form Finding and Path Systems* se puede observar la clara relación entre las formas y los procesos naturales.

Por último, para la realización del e proyecto experimental se han ojeado otros trabajos realizados por estudiantes de la Universidad de Caracas, entre ellos el ensayo *Objeto a partir de la rigidización de estructuras de membrana* en el que buscan los mejores resultados con telas de nylon y lycra y la capacidad de estos materiales para adaptarse a las formas curvas.

En la presente revisión y análisis se pretende relacionar todos estos campos y aplicarlos de forma experimental para tomar datos de forma práctica y poder relacionar los resultados con los ya obtenidos anteriormente.



## METODOLOGÍA

Este trabajo de final de grado está dividido en tres capítulos, el primero se ha realizado con la intención de conocer los procesos físicos, las relaciones más significativas entre forma, fuerza, masa etc. Además, en esta primera parte ha servido como marco teórico para poder profundizar en la segunda parte, capítulo de análisis de obras. Y, por último, el tercer capítulo, parte experimental en la que se llevan a cabo las reflexiones de los capítulos anteriores.

Se ha realizado una revisión bibliográfica con el fin de recopilar estudios acerca de la relación entre la forma y la estructura, de las formas con origen en la naturaleza y de los materiales y características de las formas más utilizadas en la arquitectura. Igualmente se ha realizado una segunda revisión bibliográfica para obtener información sobre los arquitectos más significativos de este movimiento y sus obras.

Las bases de datos electrónicas en las que se ha realizado la búsqueda han sido *riunet*, *dialnet.unirioja*, *tesis doctorales en red* y *Teseo*. Además, se han consultado artículos de prensa sobre los arquitectos a analizar. Muchos de estos artículos periodísticos han ayudado a crear un contexto histórico cultural del momento del auge de sus obras. Como fuente electrónica también encontramos los vídeos que nos han proporcionado algunos blogs sobre arquitectura, Plataforma arquitectura entre ellos. Por otra parte, también se han consultado libros de la Biblioteca Central de la UPV y apuntes de la asignatura de estructuras II.

Como criterio de búsqueda se han utilizado las siguientes palabras clave: *estructuras desplegadas, forma, estructura, formas naturales, catenarias, cúpulas geodésicas, formas funiculares, estructuras eficientes, sostenibilidad, tensoestructuras, membranas textiles, mallas espaciales, arquitectura experimental*. El criterio de búsqueda era la presencia de las combinaciones de estas palabras en el ámbito del artículo, sobre todo si la combinación era la relación entre las formas y la estructura final que producen. En la primera búsqueda no se especificó ningún filtro con respecto al tipo de arquitectura, etapa arquitectónica, ni arquitectos experimentales. En la búsqueda de la segunda parte del documento se especificó que los artículos, libros ensayos etc., fueran de Frei Otto y Emilio Pérez Piñero, también de arquitectura desplegable y de arquitectura textil. No se puso ninguna restricción en el idioma, aunque en la revisión se han rechazado los artículos que no se encuentren en inglés.

El proceso que se ha realizado para llevar a cabo el presente trabajo de final de grado se ha elaborado en tres partes distintas. En primer lugar, se ha efectuado una búsqueda inicial cuya finalidad era una primera aproximación al tema de estudio, se realizó tanto para el tema teórico como para el análisis de obras. Posteriormente, se ha procedido a una búsqueda más exhaustiva, búsqueda sistemática, en todos los campos a estudiar, además de una profundización en las obras para poder elegir solo cuatro a desarrollar en el análisis. Por último, la búsqueda manual se ha llevado a cabo a partir de la bibliografía disponible de los artículos, ensayos, libros etc., seleccionados con la finalidad de recoger suficiente información para poder desarrollar el trabajo.

Se va a detallar este proceso, para explicar correctamente las búsquedas antes citadas.

#### \_Búsqueda inicial.

La finalidad de esta búsqueda era conocer la cantidad de información publicitada sobre el tema de estudio y la existencia o no de información, así como detectar cuales de las bases de datos tanto físicas como electrónicas eran las más adecuadas para la estrategia de búsqueda más detallada. Tras disponer de suficiente cantidad de publicaciones se dispuso a pasar a la búsqueda sistemática.

Las publicaciones obtenidas en esta primera búsqueda ayudaron a formar el marco general y la base del trabajo.

#### \_Búsqueda sistemática.

En esta fase se seleccionaron las publicaciones a partir de las obtenidas en las búsquedas iniciales, con el fin de reducir el volumen. Como estrategia se eliminaron las publicaciones que no seguían los criterios de inclusión. El resumen de la publicación agilizaba este proceso para ver la relación o no con el tema a desarrollar.

La última selección se realizó tras la lectura completa de cada una de las publicaciones, estas debían ser útiles para la justificación del trabajo, el análisis de obras, para el capítulo experimental o como indicador del estado actual de la cuestión.

#### \_Búsqueda manual.

La búsqueda manual se realizó con la intención de conseguir investigaciones adicionales que no habían sido halladas o identificadas en las búsquedas anteriores. Se comprobó la bibliografía que se presentaba en los artículos y tesis elegidos. Esta resultó útil para la localización de nuevas publicaciones que se han incluido en el trabajo.

Esta última búsqueda no se realizó solamente a partir de la bibliografía de artículos ya seleccionados, si no que se tuvieron en cuenta las publicaciones que algunos autores proponía como artículos consultados y, además, publicaciones indicadas por el tutor, como por ejemplo tesis o libros.

#### \_Criterios de inclusión

Estudios realizados con: membranas textiles, estructuras con cables, estructuras pretensadas.

Arquitectos que relacionan las formas naturales con la arquitectura, las fuerzas internas y las formas.

Ensayos sobre arquitectura experimental.

Obras de Frei Otto y Emilio Pérez Piñero.

## OBJETIVOS

La finalidad principal del presente trabajo de final de grado es analizar las estructuras orgánicas o aquellas en las que su forma surge de un proceso natural. Estructuras capaces de trabajar con un mínimo espesor y una forma que ha surgido gracias a procesos físicos. Estas producen superficies mínimas que trabajan a tracción.

Se han planteado una serie de objetivos para poder realizar un estudio tanto teórico como práctico. Se han consultado fuentes como tesis doctorales, artículos, ensayos, libros, vídeos e imágenes. Además de reuniones con el tutor y con los coordinadores de la asignatura. El objetivo más importante es mostrar que no existe posible desvinculación entre las formas y la estructura.

Los objetivos secundarios que se han planteado son la profundización en los tipos estructurales basados en la rigidización de estructuras de membrana, estudio de la historia de la arquitectura textil, autores que han investigado sobre el tema y análisis propio de la cuestión.

Los propósitos permitirán identificar y valorar el comportamiento de los cuerpos, los materiales utilizados para este tipo de construcciones, propuestas de mejora y la relación de ellos con las nuevas arquitecturas. Para ello se va a realizar un análisis previo de la historia de la construcción, breves descripciones sobre los tipos de formas y todo esto se vinculará con las tipologías que desarrollaron los arquitectos analizados, además de adaptar esta teoría un proyecto experimental.

Parte del análisis se basará en las obras de Frei Otto y Emilio Pérez Piñero importantes referentes de la arquitectura experimental, la cual se preocupa por el mínimo consumo de materiales y las formas naturales. Se incluirán referencias y análisis de otras teorías como la de Antonio Gaudí.

El objetivo final de este trabajo de final de grado es el aprendizaje a partir del análisis y experimentación sobre las formas, las estructuras naturales y la relación de estas con las hechas por el hombre. Se pretende conocer este tipo de arquitectura y la aplicación de la naturaleza en las estructuras. Además de poder aplicar los conceptos a un proyecto propio a través de la experimentación.

## CONCEPTO DE FORMA Y DE ESTRUCTURA\_I

RELACIÓN FORMA Y ESTRUCTURA\_ I.1

PROCESOS NATURALES DE GENERACIÓN DE LA FORMA \_I.2

RELACIÓN MASA, FORMA Y ESTRUCTURA\_ I.3

SOSTENIBILIDAD Y EFICIENCIA \_I.4

HISTORIA\_ I.5

## I. CONCEPTO DE FORMA Y ESTRUCTURA

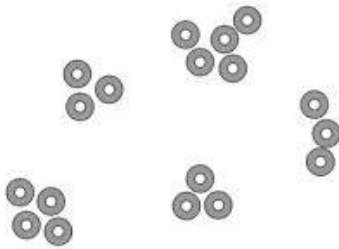
La forma es la característica principal de los objetos, se trata de una descripción geométrica con líneas, puntos, curvas y planos. La combinación de todos estos proporciona una gran variedad de posibilidades. Cuando se mira un objeto se perciben formas, la mente percibe este conjunto de formas como estructuras.

Según la teoría Gestalt, el principio de percepción de la forma trata de ligar las formas captadas con la memoria visual, de esta forma el cerebro es capaz de percibir más rápidamente las formas. Este proceso se basa en leyes, es decir, las capacidades que tiene la mente para relacionar los elementos según su posición en el espacio.



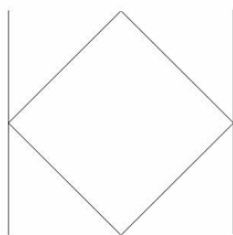
La ley de cierre es aquella en la que visualmente es más cómodo y fácil de percibir, una forma cerrada tiene mejor organización, son más estables y el cerebro no tiene que cerrarla con la imaginación, son rápidas de distinguir.

Fig.1: Ley de cierre Fuente: Realizada por el autor



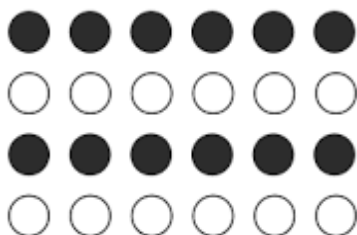
La ley de proximidad, la posibilidad de reconocer los elementos como forma, es más fácil si estos están agrupados que si están dispersos en el espacio.

Fig.2: Ley de proximidad Fuente: Realizada por el autor



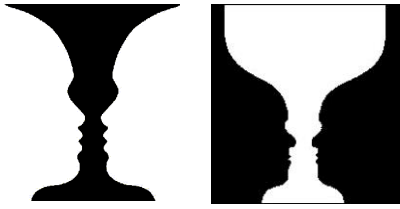
Ley de simplicidad, capacidad de descomponer las formas como elementos básicos que se reconocen a simple vista. Se observan los elementos de la forma más simple posible.

Fig.3: Ley de simplicidad Fuente: Realizada por el autor



Ley de la similitud, se tiende a conectar todas las formas similares, es decir todas las formas iguales se intentan agrupar para facilitar la visión del conjunto.

Fig.4: Ley de similitud Fuente: Realizada por el autor



Ley de figura fondo, una figura o elemento no puede asociarse a la vez como fondo y como figura, es decir un conjunto de elementos creará una forma, una figura, que esta se debe de distinguir del fondo.

Fig.5: Ley de fondo figura Fuente: Teoría Gestalt blog



Ley de continuidad, un conjunto de elementos conectados entre sí, crean un flujo, se percibirán como un todo, es lo que sucede cuando hay un conjunto de puntos alineados que se muestran como una línea. También llamado, movimiento común los elementos de una misma dirección tienden a verse como un todo.

Fig.6: Ley de continuidad Fuente: Realizada por el autor

La forma se determina a través de los elementos que la compone, el tamaño, la proporción entre los elementos. La mayoría de formas que se observan día a día son formas complejas, estas se pueden descomponer en formas más simples. Por una parte, el punto es la expresión mínima de cualquier forma, todas las formas están compuestas por puntos. Si se repiten muchos puntos se formará una línea, la línea muestra movimiento y dirección. Un conjunto de líneas tanto rectas como curvas crean un plano y el conjunto de este es la forma. La forma perfecta es el círculo, provoca sensación de fragilidad, movimiento y evolución.

**La estructura es el conjunto de las formas**, si una forma permanece constante, es decir no varía la posición de sus puntos, se produce una interacción de las fuerzas internas de conformación de la forma y estas fuerzas son las que explican la estructura. Si hay movimientos de puntos, no hay equilibrio y por tanto el sistema no es estable, no hay estructura. Existen leyes físicas que mantienen una forma, esta forma nos da una determinada estructura (1L23). Las estructuras trabajan como el resultado de un conjunto, es decir, no son elementos sueltos con funciones aisladas, sino un conjunto de elementos con una función común. De que sirve un soporte si no debe sujetar nada, o cómo un forjado sin la presencia de muros o soportes no puede ejercer su función. Cada elemento de la estructura posee una función determinada, pero sin la relación de las funciones de todos los elementos de la estructura no hay conjunto.



Fig.7: Primera estructura Gridshell, Vladimir Shújov, 1896

Fuente: [www.floornature.es](http://www.floornature.es)

Si se analiza la figura 7, se observa como un conjunto de elementos, en este caso una cantidad limitada de listones de madera forman una red. Se trata de una serie de puntos, donde se cruzan los listones que no se mueven por ello forman una estructura. A su vez estos conjuntos de formas componen la estructura pues se trata de una red de triángulos que al combinarse forman una malla espacial cuyas directrices principales forman cuadrados, por último, al curvar y rigidizar los puntos se forma un volumen, la forma final de la estructura es una superficie curvada.

**La estructura depende de las fuerzas a soportar**, de los materiales utilizados, de la geometría, es por tanto el conjunto de todos estos. No todas las estructuras son capaces de soportar las mismas cargas. En la edificación la estructura posee un papel imprescindible pues es el esqueleto que sostiene, es el elemento más importante en la arquitectura, pues sin estructura no es posible construir. Además, la estructura es la encargada de organizar el espacio, por este hecho y por las innovaciones tecnológicas, la estructura ha ido evolucionando para cubrir las necesidades del lugar. Esta evolución ha conseguido que en la actualidad haya estructuras que se suponía imposibles, nuevos materiales de construcción que sean más ligeros, tanto la evolución de la arquitectura como la evolución de la sociedad han influido en la forma de proyectar de los arquitectos. En las últimas décadas muchos arquitectos han buscado la forma de separar estructura de espacio, para que esta no interfiera en el interior de la construcción. Es lo que sucede en los proyectos de Frei Otto con estructuras ligeras sin la necesidad de gran cantidad de soportes o en los edificios de grandes voladizos de David Chipperfield.



Fig.8: Tanzbrunnen, Frei Otto Fuente: Frei Otto, complete Works Fig.9: Veles e Vents, D. Chipperfield Fuente: sanahujapartners.com

## I.1 RELACIÓN ENTRE FORMA Y ESTRUCTURA

Las formas son las encargadas de crear estructuras, la materialización de la forma tiene como resultado estructuras. Dependiendo del material utilizado la relación entre forma y estructura se ve más claro, cada tipo de material podrá dar unas formas determinadas que crearán un tipo concreto de estructura. En elementos ligeros es donde más clara se ve dicha relación, pues se trata de estructuras óptimas en las que se crean estructuras capaces de soportar grandes cargas con la menor cantidad posible de material, estas obras se componen de formas simples, pues la forma y estructura se fundamentan principalmente en la geometría.

**La geometría da orden a la construcción** y a la organización de los elementos para crear sistemas, es la disposición ordenada que posibilita la estructura. Sin el orden geométrico no habría relación entre elementos y por tanto no habría fuerzas que los mantuviesen unidos. Las agrupaciones geométricas posibilitan el funcionamiento de las estructuras, a partir de una red o malla geométrica se genera una nueva forma, para adaptarse a esta nueva configuración de los elementos geométricos aparecen fuerzas internas, el conjunto de geometría y fuerza nos da una nueva estructura.

Un claro ejemplo de la relación de las formas geométricas con la estructura son las celosías, en ellas una forma geométrica como es el triángulo, al combinarse con otros triángulos crea una nueva geometría, crea una red. Esta red crea una estructura que trabaja distinto que si se tratase de un único triángulo.

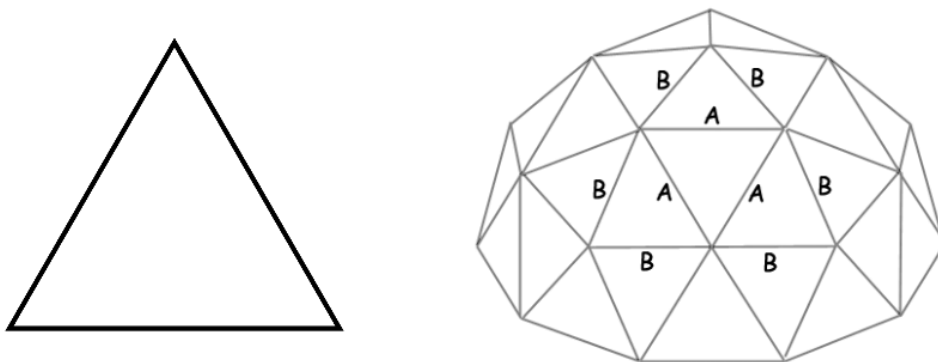


Fig.10: Relación triángulo-malla espacial Fuente: domosargentina.com

El triángulo es el polígono más simple, pero el que más fuerza posee. El triángulo no se puede deformar, con los cuadriláteros sucede lo contrario, pues si aplicamos una fuerza sobre ellos con el tiempo se deforman. El triángulo por tanto tiene una gran rigidez y es por ello uno de los polígonos más utilizados en la construcción. Una buena estructura triangulada es aquella que no soporta esfuerzos de flexión.



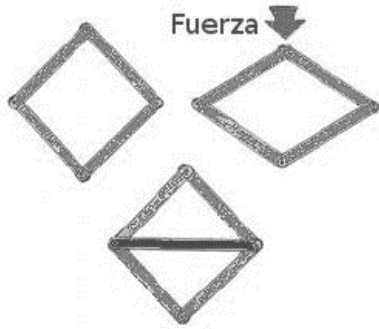


Fig.11: Deformación de los cuadriláteros Fuente: Realizada por el autor

Si la forma de un sistema estructural cambia, provoca un cambio en la manera de trabajar de los elementos que la compone y cuanto más se conozcan las fuerzas exteriores aplicadas mejor se podrá analizar el comportamiento del sistema. Pues si se aplican cargas capaces de transformar la forma del objeto se producirán cambios en las fuerzas internas, deformaciones y se necesitarán cambios en la estructura. Por lo que, si conocemos las fuerzas exteriores se podrá llegar a una mejor solución del proyecto. En la imagen anterior (Fig.9), se observa como al aplicar una fuerza el conjunto se deforma, por tanto, cambia la forma del sistema y se debe de buscar una solución para que la estructura siga trabajando de forma correcta, por eso se opta por triangular la pieza. Según Frei Otto, la forma no está predeterminada, sino que surge casi sola a partir del diagrama de fuerzas (IL23).

**Las formas surgen de la naturaleza**, autores como Antonio Gaudí, Frei Otto y Edmund Burke afirman y desarrollan este concepto, por eso un punto clave de la relación entre forma y estructura es la relación de las formas naturales. Pues la estructura se desenvuelve en la naturaleza, todo elemento natural tiene una forma determinada que surge de procesos naturales. Este sería el concepto de forma resistente, pues un elemento natural como por ejemplo una hoja adopta una forma u otra dependiendo de la posición en la que se encuentre, las fuerzas que sostiene adoptan una forma bajo la cual puede resistir los esfuerzos solo con su morfología. En las formas naturales es donde mejor se ve la relación entre forma y estructura, entre forma y fuerza. Pues la geometría está presente en la naturaleza, pero esta geometría no es una geometría clásica sino se trata del conjunto de varias geometrías clásicas que dan como resultado una geometría compleja en la que se rige el espacio, los cuerpos. Las formas naturales son las únicas capaces de llegar a la máxima perfección y belleza, como explica Burke.

*“La pasión que produce lo que es grande y sublime en la naturaleza, cuando estas causas obran con mayor fuerza, es el asombro: y el asombro es aquel estado del alma en que todos sus movimientos se suspenden con cierto grado de horror. En este caso está el ánimo tan lleno de su objeto, que no puede dar entrada a otro alguno, ni por consiguiente raciocinar sobre el que le ocupa. De aquí nace el grande poder de lo sublime, que lejos de ser producido por nuestros raciocinios, los anticipa y nos lleva arrebatadamente a ellos por una fuerza irresistible. El asombro es el efecto de lo sublime es su más alto grado.”*  
(BURKE, Edmund, *Indagación filosófica sobre el origen de nuestras ideas acerca de lo sublime y lo bello*, Trad. Juan de la Dehesa, Valencia. Colección de Arquitectura 19, 1985, p.110, Ed. Original, London,1757).

La relación de la forma y de la estructura en la naturaleza se puede relacionar con la arquitectura, pues muchos arquitectos, Antonio Gaudí entre otros, han utilizado las formas naturales como objeto de estudio para crear sus propias estructuras. Las formas naturales son estructuras simples, el estudio de ellos ha aportado grandes avances a la arquitectura. Por una parte, el estudio de las cáscaras y caparazones, como en las obras de Félix Candela, muestran estructuras laminares muy eficaces (Fig.10), con poco espesor se consigue protección y rigidez. Este fenómeno se aplica a la arquitectura con cubiertas de gran tamaño muy ligeras como es el caso de los proyectos que posteriormente se analizarán. Hay cáscaras reticulares, en la que la eficacia se ve mejor. Se trata de estructuras en las que la superficie a pesar de no ser continua actúa como tal, de este modo se crean estructuras más ligeras capaces de soportar grandes acciones. Además del estudio de cáscaras para ser aplicado al mundo de la construcción también se han estudiado esqueletos para resolver problemas estructurales en los que un caparazón no es suficiente y se requiere rigidizar el interior. Sería el caso de los barcos en los que hay una parte rígida exterior que actúa como protección y una estructura interna capaz de soportar las cargas y rigidizar para que el empuje contra la envolvente no la deforme (Fig. 13).



Fig.12: Pabellón Rayos cósmicos, F.Candela. Fuente: archadaily.com

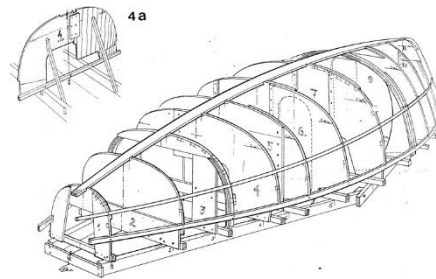


Fig.13: Est. Barco. Fuente: archadaily.com

Parte del análisis que se va a realizar se basa en las obras de Frei Otto, pues en ellas se ve una clara relación de las formas con la estructura, con los materiales etc. Sus formas surgen de todos estos parámetros, se trata de formas orgánicas que proporcionan estructuras ligeras. Parte de su obra se centra en las estructuras de membranas, estas son estructuras traccionadas. Las estructuras traccionadas o tensadas imitan a la naturaleza, esta es la ideología de Frei Otto. En su estudio de las formas y de los materiales explica como las estructuras tensadas utilizan la menor cantidad de material, son elementos ligeros y permiten la construcción de espacios de gran tamaño y diáfanos, la forma de las superficies textiles también depende de la geometría y del equilibrio de esta con las fuerzas de tracción de las membranas.

## I.2 PROCESOS NATURALES DE GENERACIÓN DE LA FORMA.

La forma surge de las leyes físicas que gobiernan la naturaleza, interpretación de las formas de Frei Otto (*IL22*), si estas leyes se aplican a la construcción aparecerán estructuras ligeras en las que como sucede en la naturaleza las fuerzas interiores son las encargadas de producir la forma exterior capaz de resistir las fuerzas aplicadas y el movimiento de las fuerzas interiores para equilibrarse. Se trata de un proceso natural de autogeneración de la forma y las formas que se adoptan son formas orgánicas (Fig.14). Para combinar los procesos naturales de generación de la forma con la arquitectura se puede explorar la estructura a través de la experimentación, es decir con el uso de maquetas, analizando la relación entre la forma y los materiales, esta experimentación dará como resultado una forma externa que es la representación de las fuerzas internas, se trata de una forma no buscada, si no una forma que ha surgido por el análisis y la comunicación directa con los materiales.

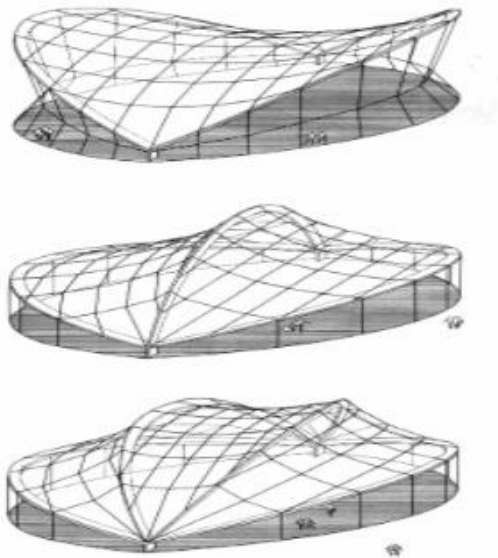


Fig.14: Est. Forma activa. Fuente: *Sistemas de estructuras*. Heino Engel

En la figura 14, se muestran estructuras de forma activa, así son como las clasificó Heino Engel en su libro *sistemas de estructuras*. Estas formas, son orgánicas pues se adaptan a la superficie que deben cubrir con el menor espesor y peso posible, es lo mismo que sucede en las cáscaras de los seres vivos. La estructura de los edificios se compone de la repetición de los elementos, al igual que sucede con las estructuras biológicas que se componen de unidades más pequeñas, células. Esta es la relación más significativa entre un cuerpo natural y una construcción. En las estructuras biológicas la distribución de los componentes se produce gracias a los **fenómenos de autoorganización**, en este proceso la organización del sistema se adapta al medio según la función que desempeña, por tanto, la forma se genera desde fuera. Estos procesos en los que la forma surge del exterior sin que se condicione se llaman procesos naturales de generación de la forma.

En la construcción estos procesos de generación de la forma son experimentales, no se puede determinar una forma sin ensayar los procesos más eficientes, los tipos de materiales, las cargas externas etc. Este conjunto de parámetros son los determinantes de la forma y por tanto de la estructura. La geometría en la que se basan estos procesos es una geometría reglada, es la que se encuentra en la naturaleza. La **geometría reglada** fue descubierta por Antonio Gaudí, toda su obra se inspira en la naturaleza, sus formas son parábolas, hipérbolas, espirales. Para conseguir estas formas además de estudiar la naturaleza y experimentar con ella, trabaja con maquetas de hilos, cadenas y sacos, suspendiéndolos y observando las formas que aparecen solo con la influencia de las fuerzas y de las leyes físicas de la naturaleza.

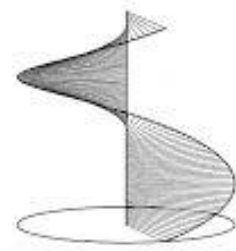


Fig.15: Park Güell Fuente: Realizada por el autor

Fig.16: Espiral Natural Fuente: scopnest.com

Fig.17: Espiral Fuente: Propia

Parte de la investigación se va a centrar en las **superficies regladas** y en la experimentación para conseguirlas. Las superficies regladas son aquellas que surgen del movimiento de una recta en el espacio, este movimiento crea una curva (*teoría de A. Gaudí*). Por ello cuando se cuelga un hilo y se deja que los pesos propios de este y la gravedad actúen sobre él, este pasa a deformarse creando una curva. Esta curva es una catenaria o curva perfecta, y su descubrimiento ha sido un gran avance para la arquitectura ligera. Pues al tratarse de formas naturales estas no necesitan ser rigidizadas porque la forma por si misma es capaz de resistir las acciones tanto externas como internas.

Otra forma de experimentar con la naturaleza para conseguir formas naturales es con pompas de jabón, proceso físico con el que Frei Otto investigó sobre la relación entre las formas y las fuerzas. Las formas obtenidas por este proceso físico al igual que las formas obtenidas con las maquetas de hilos, que también desarrolló en muchas de sus obras, nos proporcionan formas eficientes. Frei Otto explica como las pompas de jabón adquieren formas en las que para un volumen concreto aparece una superficie mínima, la forma que se crea es la mínima por eso son estructuras eficientes (*Frei Otto: Estructuras p.3*). Si se estudia la estructura de la pompa de jabón se puede aplicar a las estructuras neumáticas, cualquier incremento de tensión en un punto de la pompa de jabón será transmitido al resto de la estructura, por tanto, todos los puntos de una estructura neumática presentan el mismo estado tensional. Esta teoría también se aplica para las estructuras esféricas que más tarde se estudian.

### I.3 RELACIÓN MASA, FORMA Y ESTRUCTURA.

*"La forma arquitectónica es el punto de contacto entre la masa y el espacio... Las formas arquitectónicas, las texturas, los materiales, la modulación de luz y sombra, el color, todo se combina para infundir una calidad o espíritu que articule el espacio. La calidad de la arquitectura estará determinada por la maestría que el diseñador despliegue al utilizar y relacionar estos elementos tanto en los espacios interiores como en los que envuelven los edificios". (Bacon, E.N, 1974).*

La forma arquitectónica y el conjunto de formas crean una estructura. Este conjunto o estructura que se ha generado a partir de procesos naturales tendrá una forma u otra dependiendo de la masa. **La materia influye en la estructura**, por tanto, en la forma; concepto desarrollado en el artículo *"El estudio de la forma desde la dimensión material"*. La materia determina la forma, por el peso, la rigidez, la capacidad de deformación de este, etc.

Por una parte, a nivel constructivo el tipo de material es importante. Los resultados experimentales no serán los mismos si se construye una celosía con acero que si se construye con madera, pues las propiedades del acero proporcionan un mejor resultado estructural a nivel de deformación que las propiedades de la madera. En estructuras ligeras es donde más notable es este tipo de cuestión, pues se buscan materiales capaces de soportar grandes cargas utilizando pequeñas cantidades y de poco espesor. Es por ello por lo que en la parte de análisis se va a centrar la atención en este tipo de estructuras. Por otra parte, las estructuras textiles también proporcionan buenos resultados, pues con poco espesor pueden cubrir grandes superficies.



Las **tenso-estructuras** o estructuras textiles, son estructuras que trabajan a tracción. De esta manera la cantidad de material es mínima y la estructura no sufre problemas de pandeo, además los esfuerzos de tracción estabilizan y por ello no es necesario rigidizar la estructura.

*Fig.18: Umbrella for Pink Foyd concert Fuente: Frei Otto complete works*

El peso de la materia utilizada también influye en el **resultado estructural**, pues la estructura debe soportar tanto las cargas aplicadas sobre ella como su peso propio. Si se utiliza un material pesado como es el caso del hormigón o bien se utilizará poca cantidad de este o la estructura deberá ser de mayor tamaño para poder soportar el peso propio. Arquitectos como Félix Candela y Eduardo Torroja experimentaron con cáscaras de hormigón. Su arquitectura buscaba también la eficiencia, construían con la menor cantidad posible de materiales para que esta pudiera soportar las cargas.



Fig.19: Restaurante Xoximilco, Félix Candela Fuente: ordigami.net

La rigidez del material también influye en la relación forma y estructura, pues cuánto más resistente sea un material menor cantidad de este necesitaremos y por tanto habrá una estructura más clara. La rigidez condiciona la estructura pues si un material es más rígido es por tanto menos deformable y es capaz de resistir fuerzas mayores. Si un material se deforma con facilidad la estructura sufre cambios y por tanto la forma del conjunto varía.

## I.4 EFICIENCIA Y SOSTENIBILIDAD

Las estructuras que surgen de estos procesos naturales son estructuras efectivas, ya que poseen eficacia y eficiencia. Las estructuras que se van a analizar y las descritas en los puntos anteriores cumplen estos requisitos pues la organización espacial de sus elementos crea estructuras ligeras capaces de poder cumplir su función con la cantidad mínima de materiales, concepto de estructura mínima según Frei Otto (*Frei Otto: Estructuras p.3*).

Se caracterizan por su óptima organización, es decir estructuras ligeras, con la menor cantidad de elementos estructurales, con formas sencillas que trabajen correctamente. Una menor cantidad de elementos estructurales proporciona espacios más diáfanos capaces de cambiar su espacio interno, sin la necesidad de apoyos que dificulten la organización interna. Se trata de estructuras que se pueden desmontar con facilidad, por su clara geometría ya que se pueden distinguir los distintos elementos que la compone. Como se ha analizado en los puntos anteriores, estas estructuras surgen de geometrías sencillas como es el caso de las formas gaudinianas, las celosías, las cáscaras. Todas estas son estructuras eficientes por su composición poco compleja, cuánto más simple sea una estructura el estudio de sus fuerzas internas será más fácil y por tanto la solución tensional y constructiva podrá ser más sencilla.



Fig.20: Estadio olímpico, Múnich Fuente: Frei Otto Complete Works

Las estructuras más eficientes son aquellas que trabajan a tracción. Por una parte, una estructura que trabaje a tracción puede ser más fina, pues se trata de elementos que van a ser estirados. Los materiales utilizados deben ser de gran flexibilidad, es decir poco extensibles y con elevada resistencia a tracción para que al aplicar las fuerzas externas no se deforme y pierda su función estructural. Estos armazones de elementos que trabajan a tracción pueden ser lineales o superficiales, distinción de estructuras de Heino Engel (*Sistemas de estructuras*).

En el caso de conjuntos de cables son hilos de escasa sección y gran longitud. La rigidez del sistema se puede ampliar cruzando cables, con elementos rígidos como vigas y celosías, creando redes de cables en dos niveles, solución de Shigeru Ban y Frei Otto en el pabellón Japonés de la Expo de Hannover 2000 contiene una red de cables como estructura principal. Para que la estructura pueda soportar más cargas se pueden atirantar los cables en algunos puntos y anclarlos al suelo. Si se aumenta la sección del cable y las cargas a resistir son menores, aparece un incremento en el esfuerzo de tracción de la estructura y de esta forma las deformaciones son menores.

Si se trata de elementos superficiales el espesor es despreciable frente a la superficie. Estos elementos son adaptables, pues al soportar las cargas adquieren la forma óptima para resistir los esfuerzos. Como elementos superficiales que trabajan a tracción tenemos membranas textiles, tejidos de alambre, chapas traccionadas.

El término eficiencia va ligado a la sostenibilidad, pues estas estructuras han sido diseñadas respetando el medio ambiente (*Frei Otto a life of research construction and inspiration*). Exploran métodos constructivos en los que no se dañe el medio en el que se encuentra ni a corto ni a largo plazo, por eso trabajan con formas naturales en las que la transmisión de cargas sea simple. El uso de los materiales también tiene en consideración el entorno pues en muchas de este tipo de edificios se usan materiales reciclados. Además, se intenta emplear la menor cantidad posible de materiales y materiales autóctonos para que creen el menor impacto posible en el paisaje.

Se trata de construcciones en las que los procesos utilizados y los materiales son innovadores. Se considera a Frei Otto como pionero de la arquitectura sostenible, el pensamiento de Frei Otto se basaba en métodos de construcción efectivos con el empleo de pocos materiales. Pues la base de todas sus obras es que la arquitectura debe tener el mínimo impacto posible en la naturaleza. Afirmaba que hay que construir con consciencia pues de que sirve construir grandes edificios si la sociedad no los necesita.



Fig.21: Aeropuerto de Stuttgart Fuente: Frei Otto Complete Works

A nivel nacional como arquitecto sostenible y posterior a Frei Otto, encontramos a Emilio Pérez Piñero. Su arquitectura buscaba ser eficiente creando grandes envolventes con la menor cantidad posible de materiales. Estas estructuras además de eficientes eran desplegadas y transportables. De esta forma se podían utilizar en varios sitios y se reducía el uso de materiales. Su obra es menos extensa que la de Frei Otto, pero en ambas podemos observar el nuevo pensamiento del siglo XX en el que la naturaleza y la preservación del medio ambiente empezaba a formar parte del proyecto.



Fig.22: Emilio Pérez Piñero Fuente: Fundación Emilio Pérez Piñero, Calasparra

Por tanto, las estructuras experimentales en las que se forma surge del interior, es el resultado de las fuerzas internas, son estructuras eficientes por su forma de utilizar los recursos disponibles al máximo y también son sostenibles por su respeto al medio ambiente. Este tipo de arquitectura en los que la forma ha surgido de forma experimental es una arquitectura innovadora y posee una visible relación con el entorno, es la arquitectura que se va a estudiar posteriormente. Por una parte, se van a analizar y estudiar obras de Frei Otto y Emilio Pérez Piñero, por su gran aportación al mundo de la arquitectura experimental del siglo XX. Además, en sus obras la relación entre forma y estructura tiene un gran papel en el desarrollo del proyecto. Por otra parte, se va a experimentar con maquetas para conseguir una estructura eficiente y poder analizar las formas y los mejores materiales para construirla.



## I.5 HITOS DE LA ARQUITECTURA LIGERA

Las obras que se van a analizar corresponden al ámbito de la arquitectura ligera y de las superficies curvadas, se diferencia en la curvatura. Ambos caminos pertenecen a las estructuras laminares y son las estructuras más eficientes. A pesar de que la arquitectura ligera se conoce desde mitad del siglo XX alrededor del 1960, si se realiza un largo paseo por la historia se observa que este campo de la arquitectura es más antiguo y se lleva practicando desde las primeras civilizaciones.

Las membranas se han utilizado para velas de barcos, tiendas de las civilizaciones nómadas. Estas tiendas son las más próximas a las actuales membranas ligeras eran flexibles, fáciles de montar y ligeras para que su transporte fuera más cómodo. Se utilizaron en diversos territorios y cada uno con distintas formas dependiendo del lugar en el que se fueran a colocar. Estaban formadas por pieles apoyadas sobre soportes, elementos a compresión



Fig.23: Tiendas de las primeras civilizaciones Fuente: [www.artofmanliness.com](http://www.artofmanliness.com)

Los egipcios y asirios ya utilizaban los paraguas, se les puede considerar por tanto los pioneros de las tenso-estructuras desplegadas. Los toldos para proteger del sol los empezaron a utilizar los romanos para cubrir los anfiteatros, fueron las primeras estructuras formadas por telas e hilos con poleas para abrir o cerrar la cubierta. En las zonas del sur de la península se tendían toldos por las calles, actualmente en muchas ciudades españolas se siguen colocando estas telas.



Fig.24: Paraguas egipcios Fuente: [www.artofmanliness.com](http://www.artofmanliness.com)

Finalmente, las grandes aportaciones de las tenso-estructuras a la arquitectura se produjeron en 1960 y actualmente se siguen creando miles de estructuras ligeras y tenso-estructuras al año. Los primeros arquitectos en desarrollar construcciones ligeras son David H. Geiger, Fritz Leonhardt, Kenzo Tange y Frei Otto, en el que vamos a centrar parte de la siguiente investigación.

David H. Geiger, fue el primero en desarrollar una cubierta aérea tipo tensegrity, sus estructuras eran cúpulas de membranas traslúcidas. Se trataba de una arquitectura de bajo coste que se utilizó para construir gran parte de los estadios y pabellones deportivos de Estados Unidos.

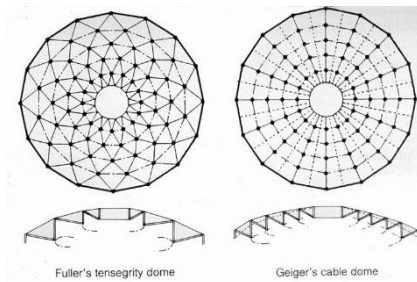


Fig.25: Relación c Geiger con c.Fuller Fuente: arch.structure.com

Fritz Leonhardt, sus trabajos se centraron en la arquitectura ligera con cables como puentes atirantados, el diseño de puentes le llevo a construir estructuras ligeras de hormigón pretensado. Destaca por su planteamiento experimental en el mundo de la ingeniería y arquitectura.



Fig.26: Puente Rodenkircher Fuente: puentemania.com

Kenzo Tange, precursor de la arquitectura ligera en Japón. Su obra se inicia con la construcción de estructuras de hormigón pretensado, posteriormente destaca por la construcción de estructuras ligeras de cubiertas suspendidas y cubiertas parabólicas de acero.



Fig.27: Gimnasio Nacional de Yoyogi.1964 Fuente: designkultur.wordpress.com

Todos estos arquitectos, pertenecen al movimiento arquitectónico de la innovación y la tecnología. Utilizaron nuevos materiales que hasta el momento habían estado en desuso y proporcionaron grandes avances en el mundo de la construcción.

Respecto al uso de estructuras curvadas con estructuras rígidas como pionero de las cúpulas geodésicas, de las que posteriormente se analizarán obras, tenemos a Richard Buckminster Fuller. R.B.Fuller desarrolló el concepto de Tensegridad, explica como en estas estructuras las fuerzas se transmiten por el continuo espacio creado por los elementos que trabajan a tracción y no por los elementos discontinuos que trabajan a compresión. Durante la segunda guerra mundial estudió el principio de tensegridad y lo aplicó a la arquitectura, creando grandes cúpulas. La cúpula geodésica es aquella que todas sus caras, ya sean cuadrados, rombos, triángulos... tienen sus vértices en la esfera que forman.

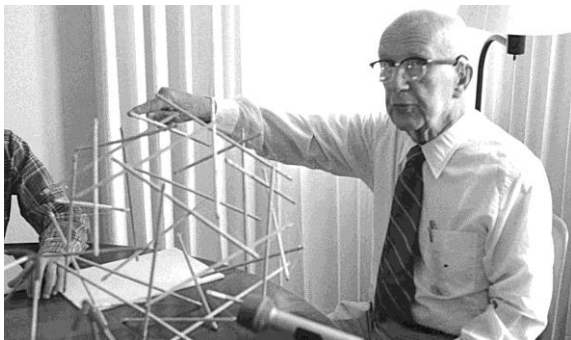


Fig.28: Tensegrity, Fuller Fuente: [www.bfi.org](http://www.bfi.org)

Otro arquitecto que aportó a la experimentación y desarrolló de las superficies curvadas, fue Antonio Gaudí. Desarrolló la teoría de la arquitectura espacial, ligada al estudio de los arcos funiculares y de las catenarias. Realizó una arquitectura que ligaba las formas naturales con las formas geométricas. Las formas geométricas de Gaudí surgen de los esfuerzos internos de la estructura como sucede en las formas de Frei Otto.

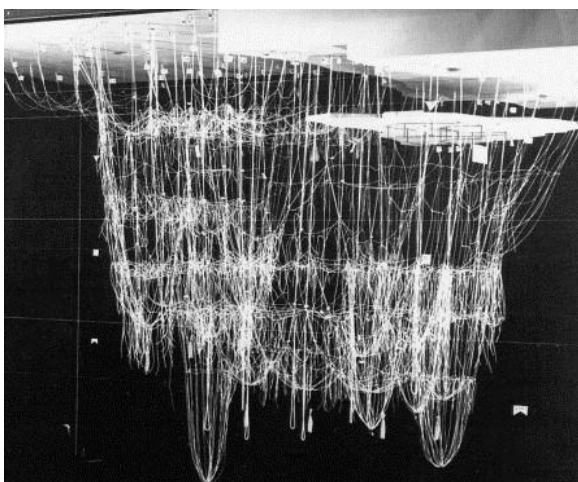


Fig.29: Maqueta de Gaudí Fuente: [fundaciónantoniogaudi.org](http://fundaciónantoniogaudi.org)

Para finalizar, cabe destacar la importancia de los materiales y del trabajo manual en la historia para poder estudiar este tipo de arquitectura. Pues los arquitectos en los que se va a centrar la investigación trabajan con maquetas e innovaron en el campo de la arquitectura tanto a nivel conceptual como a nivel de materialidad. Como punto de partida del trabajo manual tenemos los gremios artesanales, en el siglo XX se describe un gremio que entrelaza la arquitectura con la expresión creativa, este movimiento es la Bauhaus. En esta etapa surgen creaciones tecnológicas e innovadoras casi diariamente. Este movimiento impulsó a bastantes arquitectos a trabajar en la innovación tanto creativa como tecnológica para desarrollar nuevas tendencias arquitectónicas.

## **ANÁLISIS DE OBRAS \_II**

ARQUITECTURA DE FREI OTTO \_II.1.1

ARQUITECTURA EMILIO PÉREZ PIÑERO \_II.1.2

CÚPULA DE ESSEN \_II.2.1

TEATRO TRANSPORTABLE \_II.2.2

RELACIÓN ENTRE OBRAS \_II.2.3

PABELLÓN JAPONÉS EXPO2000 \_II.3.1

VELÓDROMO DE ANOETA \_II.3.2

RELACIÓN ENTRE OBRAS \_II.3.3

## II. ANÁLISIS DE OBRAS

La forma surge de elementos básicos de la geometría. Tras estudiar el concepto de geometría se puede llegar a una estructura eficiente, pues la geometría es la disposición de elementos de modo ordenado. Dependiendo de esta, podremos soportar cargas con mayor o menor facilidad.

Tras analizar detalladamente la historia y los conceptos básicos de forma y estructura, se destacan dos arquitectos como referentes para abordar la cuestión. A nivel nacional se estudian las obras de Emilio Pérez Piñero y Frei Otto como arquitecto y teórico alemán. Ambos son representantes de la arquitectura experimental del siglo XX. Su arquitectura se fundamenta en la experimentación con maquetas, consiguen la forma de sus proyectos a partir del desarrollo de estas, así consiguen estructuras que con el menor material posible puedan soportar mayores cargas para cubrir grandes espacios. Este método de trabajo recupera lo artesanal siguiendo los pasos de William Morris en el Arts and Crafts, pues un arquitecto es aquel que además de teorizar sobre la construcción es capaz de construirla con sus propias manos, es un oficio que combina la teoría con el taller.

Las estructuras ligeras de Frei Otto y de Emilio Pérez Piñero son famosas por la facilidad de montaje y la posibilidad de transporte de estas. Son innovadores y asumen retos técnicos que se utilizan para transformar la ciudad y mejorar el urbanismo, empatizando con la naturaleza. Su arquitectura proviene del legado de la arquitectura deconstructivista de los años 20, basada en la desmaterialización y en la idea, buscando nuevos conceptos de forma y de estructura. Sus obras buscan optimizar la construcción con membranas de poco espesor y material, introduciendo el concepto de eficiencia, misma función con menos materiales.



Fig.1. Frei Otto con maquetas.  
Fuente: Atelier Frei Otto Warmbronn



Fig.2. Emilio Pérez Piñero con el teatro ambulante 1961  
Fuente: Región de Murcia digital.

Esta evolución tecnológica de la arquitectura, el conocimiento de nuevas técnicas de construcción y el empleo de materiales más livianos, consiguen un nuevo diseño que plantea la forma como el resultado de la transformación material. Una transformación material proporciona un bajo coste, pues optimiza los recursos y no exige grandes inversiones. Dichos referentes plantean una arquitectura pionera en el concepto de ecologismo, permitiendo dejar atrás la estática clásica que marcaba la estabilidad de los cuerpos como algo único, en cambio en estas nuevas formas de construir la estabilidad se consigue trabajando diversos conceptos y relacionándolos entre si.

### II.1.1 ARQUITECTURA DE FREI OTTO

Frei Otto, arquitecto e ingeniero civil más característico del siglo XX. Estudió arquitectura en la Universidad técnica de Berlín, desarrolló una tesis doctoral en construcción tensada. Fundó el instituto para estructuras ligeras en la Universidad de Stuttgart. Es por esto por lo que se le considera precursor de las estructuras tensadas y membranas livianas. Su obra es reconocida mundialmente y por ello cuenta con títulos honoríficos de universidades de distintos países. Recibió premios como el Royal Gold Medal por el Royal Institute of British Architects y el premio Pritzker en 2015, días antes de que el tribunal anunciase su triunfo falleció el 9 de marzo de 2015.

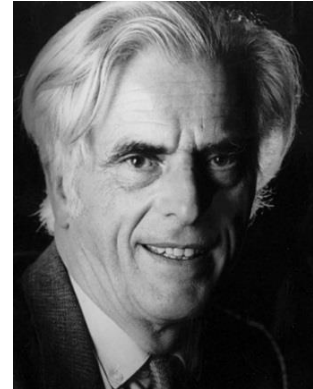


Fig.3. Frei Otto Fuente: *Inhabitat*.

Su obra es extensa, toda ella de raíces innovadoras. El objetivo principal era cubrir grandes superficies utilizando poco material, de esta forma se optimiza tanto los recursos como el trabajo. El método de trabajo elegido fue la experimentación y el estudio de la naturaleza. Frei Otto analizaba la estructura de las plantas y de los animales, de esta forma al conocer el proceso de la forma natural podía general formas que se fundamentasen en la naturaleza. Aplica la naturaleza en las estructuras, con estos ensayos lograba conseguir soluciones estructurales que hasta el momento se consideraban imposibles. Realizaba maquetas de jabón, pues de esta forma podía observar como el jabón adopta distintas formas buscando la mínima superficie. Todos sus proyectos fueron construidos previamente, realizados en maquetas o de jabón o con membranas elásticas, son modelos de pequeñas dimensiones y sirven como modelos de pruebas de carga y desarrollo de la forma.

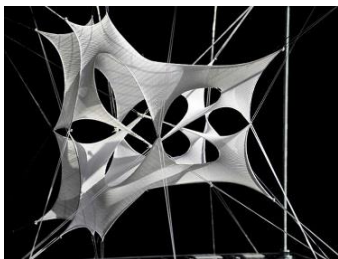


Fig.4: Maqueta experimental.  
Fuente: *Frei Otto a life of research construction and inspiration*

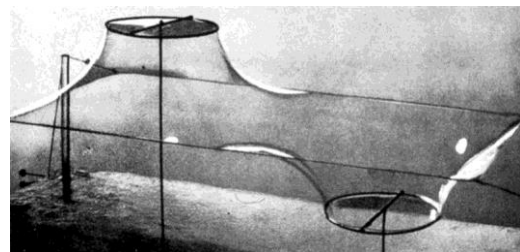


Fig.5: Maqueta de jabón  
Fuente: *Atelier Frei Otto Warmbronn*

Las obras de Frei Otto tienen en común el concepto de eficiencia, pues según la forma que le demos a la estructura esta podrá trabajar mejor con menor cantidad de material. Todas sus estructuras buscan la superficie mínima, esta característica es más observable en las maquetas realizadas con pompas de jabón, también se pueden observar en maquetas realizadas con hilos cruzados. Otra propiedad de los elementos estructurales es el pretensado, trabaja con elementos capaces de soportar grandes tensiones con espesores pequeños.

La vinculación de sus proyectos con la naturaleza se puede ver tanto en la concepción de la forma gracias al estudio de los sistemas orgánicos como con el ecologismo. Para sus obras busca entornos naturales donde sea posible la interacción del medio ambiente con la edificación. La biología de las plantas se puede observar al estudiar las formas. Por tanto, sus obras son estructuras que buscan formas biológicas, son cuerpos que trabajan de forma sostenible relacionando la función con la estética y con la seguridad.



## II.1.2 ARQUITECTURA DE EMILIO PÉREZ PIÑERO

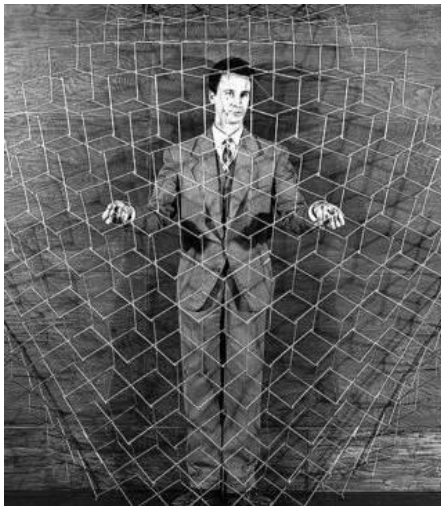
Conocido internacionalmente por la aportación de las estructuras plegables a la arquitectura. Arquitecto joven e innovador, con una carrera corta por su prematura muerte y con un pequeño abanico de obras. Su viaje por el mundo de la arquitectura internacional empezó durante su etapa de formación en la Universidad Politécnica de Madrid. Ganó un concurso de arquitectura en 1961 era el representante de España en el IV Congreso de la Unión Internacional de Arquitectos en Londres el cual trataba de estructuras para cubrir grandes espacios, el jurado declaró su invento como “una aportación técnica de primer orden”. En este concurso conoció a Félix Candela, Ove Arup entre otros. Desde este momento su interés por la arquitectura desplegable y transportable fue creciendo y es por ello por lo que se le reconoce internacionalmente.



Fig.6: Emilio Pérez Piñero

Fuente: Fundación Emilio P. Piñero

Fig7. Emilio P. Piñero



Su trayectoria profesional cuenta con pocas obras, todas ellas de carácter experimental, son estructuras transformables. Estas se caracterizan por el simple funcionamiento y la lógica constructiva. Todas ellas están provistas de ingeniosos mecanismos de pliegue y despliegue. Su estudio se centró principalmente en el desarrollo de la unión entre elementos para conseguir la transformabilidad, es decir el movimiento entre elementos de la estructura. Estos nudos son el centro de la investigación de Emilio Pérez Piñero, pues hasta el momento ningún arquitecto ni ingeniero había resuelto estas uniones, estaban formados por barras que giraban para poder plegarse alrededor de los puntos de unión, estas barras giraban hasta quedarse paralelas entre ellas.

Sus estructuras estas formadas básicamente por nudos y barras unidos entre sí, de esta forma no es necesaria la descomposición de la estructura en elementos más pequeños para su transporte.

Emilio Pérez Piñero, busca crear grandes estructuras de barras que se transporte ocupando el menor espacio posible, para su desarrollo tuvo en cuenta las dimensiones de los transportes para poder trasladar las estructuras de forma fácil y económica. El concepto de sostenibilidad y eficiencia también queda plasmado en sus obras, buscaba en sus estructuras una fácil construcción, un rápido manejo de ellas y el menor uso de materiales, por tanto, un coste menor. Con sus obras aportó nuevas soluciones tecnológicas, en cuanto al montaje de las estructuras y por ello se le considera pionero de las estructuras desplegadas. Tiene en cuenta la economía de los recursos, ampliando la resistencia de los materiales para conseguir superficies más rígidas. Con este concepto consigue crear grandes cúpulas trianguladas de gran rigidez geométrica pues el triángulo es la mejor forma básica, es indeformable. Con esta malla esencial crea superficies que se oponen a la aparición de grandes esfuerzos internos, actúa como una superficie continua.

## II.2.1 CÚPULA DE LA FERIA ALEMANA DE CONSTRUCCIÓN EN ESSEN

Esta construcción experimental se realizó por Frei Otto, John Koch, Eva Pietchy Bernd-Friedrich Romberg en 1962 para la feria de la construcción alemana. La cúpula cubría una superficie cuadrada de 15 metros de luz, su altura era de 5 metros y la separación entre las barras que formaban la estructura era de 0.48 metros. La cúpula estaba formada por listones de madera de 19 metros de longitud, su sección era de 40x60 milímetros.

### \_Maqueta experimental y montaje

Se trata de una cúpula de materiales ligeros, listones de madera conformando una celosía. La forma curvada de la cúpula no es una semiesfera completa pues la forma final se ha conseguido a través de un sistema funicular. Este sistema funicular se desarrolló a escala 1:20 y con él se conseguía una estructura capaz de soportar esfuerzos a compresión. La forma a escala real se consiguió alzando la red de listones de madera con una grúa, pues estos no se deforman con tanta facilidad como los hilos y, por tanto, la forma no se podía obtener con el mismo proceso que en la maqueta experimental, (Fig.8).



Fig.8. Maqueta cúpula de Essen Fuente: Frei Otto, complete works



Fig.9. Cúpula de Essen Fuente: Frei Otto, complete works

### \_Forma

La cúpula tiene la capacidad de crear un gran espacio cubierto sin el uso de soportes, de esta forma se consigue que el espacio sea único, pudiendo desarrollar en su interior cualquier tipo de actividad sin la aparición de problemas de distribución. Como se ha mencionado en los puntos anteriores la esfera es la forma más perfecta, en el caso de la cúpula de Essen no se trata de una esfera ni de parte de ella, pues la curvatura no es la misma en todas las direcciones, se observa en la maqueta o figura 8. Corresponde a una forma natural, como en el caso de las estructuras de Gaudí, pues emana las formas presentes en la naturaleza, además la forma se ha obtenido gracias a un proceso de autogeneración de la forma.

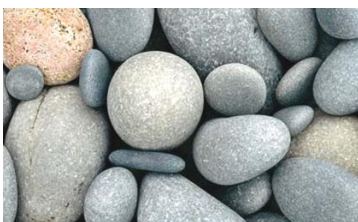


Fig.10: Cantos rodados Fuente: Propia

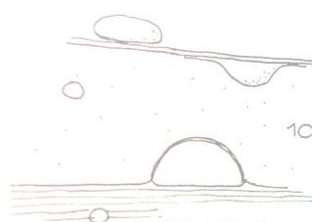


Fig.11: Formas naturales Fuente: IL23



Fig.12: Cáscara Fuente: Propia



La cúpula de Essen se puede relacionar con los cantos rodados de un sedimento rocoso, estos derivan de la erosión que provoca cambios en la forma a través de un proceso físico. En la cúpula de Essen ocurre lo mismo, la forma final es la que se obtiene a través de un proceso en el que las leyes físicas tienen un gran protagonismo. La forma final obtenida en ambos casos es la forma que mejor se adapta al medio. Por otra parte, también se puede relacionar esta cúpula con las cáscaras, un huevo se encarga de proteger el interior con una superficie de poco espesor y formando una forma alabeada no esférica. La cúpula de Essen utiliza listones de dimensión reducida capaces de resguardar el espacio destinado a las personas. La esfera, las cáscaras, las cúpulas protegen el espacio pues la superficie expuesta es menor y, por tanto, es más complicado ejercer fuerzas que la desestabilicen.

### \_Estructura.

La estructura de la cúpula está formada por listones de madera encargados de formar una celosía rectangular en la que la dimensión varía según la forma a adoptar y las cargas a resistir, de la misma forma que las ramas de los árboles tienen un tamaño y una forma dependiendo de la zona en la que se encuentren y de la capacidad de sujeción que tengan.



Fig.13: Estructura arborea Fuente: Propia

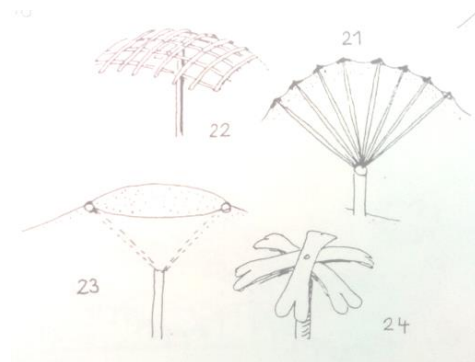


Fig.14: Esquemas Frei Otto Fuente: IL23

La rigidez de la estructura viene determinada por el material de los listones y por la rigidez de las uniones, pues estas después de levantar la estructura se rigidizaron para que la forma final no cambiase. Tras tensarse todos los elementos la cúpula de celosía trabaja como una superficie continua en la que las cargas se transmiten de forma lineal. En el caso de barras cortadas, como sucede en la zona de acceso, las fuerzas son absorbidas por listones de madera con una anchura igual a la distancia entre barras cortadas (*Frei Otto: Estructuras p.124-125*). La resistencia de los listones de madera depende de la luz y de la resistencia del material, cabe destacar que las secciones de madera macizas tienen un peor comportamiento que las secciones de madera de láminas encoladas, pues los elementos macizos bajo fenómenos de flexión son más elásticos y por tanto se deforman más que los elementos laminados.

### \_Relación forma y estructura

La forma curva de la cúpula consigue que las fuerzas que actúan sobre la estructura se repartan de forma igual, pues al tratarse de una celosía. La primera aproximación a la forma de la cúpula de Essen se realizó con un modelo funicular, las formas que adoptó la maqueta realizada con hilos eran formas naturales. Pues estas habían surgido gracias a las fuerzas internas, se consigue una superficie curva en la que se reparten de forma equitativa las fuerzas, le curvatura de la cúpula viene determinada por los esfuerzos y por la capacidad resistente. Si se comparan las estructuras con superficies alabeadas, como es en este caso, con estructuras lineales se observa que la estructura cupular es más favorable, pues se consigue cubrir más espacio en planta sin el uso de soportes, en cambio, si se observa la estructura de un edificio de viviendas se ve la necesidad de utilizar soportes para poder soportar los forjados. Las fuerzas en una superficie curva se distribuyen siguiendo las líneas que componen la forma, por tanto, en la cúpula hay dos familias de curvas o arcos, en cambio en una estructura lineal las cargas se transmiten en las direcciones del forjado hasta los apoyos y por tanto se necesita mayor cantidad de material.

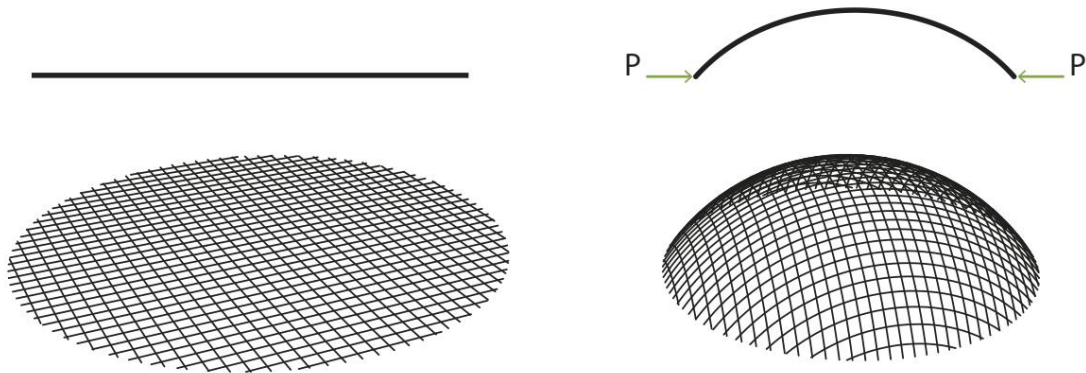


Fig.15: Fuerzas de la cúpula Fuente: Realizado por el autor

Al tratarse de una estructura plegable la forma de la cúpula puede cambiar, es decir en el momento del levantamiento se puede levantar formando otras formas que creen distintas superficies curvas, después de este levantamiento se rigidiza de la misma forma, apretando las tuercas de las uniones articuladas de la estructura, y así cambia la forma. Al cambiar la forma, también se cambia la distribución de las tensiones y el reparto de estas sobre la estructura.

## II.2.2 TEATRO TRANSPORTABLE

En 1965 el Ministerio de Información y Turismo encarga a Emilio Pérez Piñero un teatro destinado a Festivales en toda España. Este debe ser transportable, con un aforo de 1800 espectadores y que contenga todos los elementos para poder realizar representaciones, conciertos y otros eventos. Las exigencias por las que se le encarga a este arquitecto este proyecto son que el teatro sea desmontable y que se pueda transportar de forma fácil y segura. Esta estructura se inauguró en la plaza de María la Pita de La Coruña en agosto de 1966.

Opta por dos cúpulas reticulares construidas en el municipio de Calasparra, lugar del que procede, se encarga de enseñar a los artesanos locales a construir y montar las piezas de la estructura. Son dos cúpulas geodésicas a lo largo de un paralelo vertical común. Cada una tenía una altura de 11 metros y 31 metros de diámetro. Era un único módulo con ancho de 24 metros y longitud de 55 metros; su peso era inferior a 4000 Kg. Al plegar la estructura se conseguía un bloque ligero de 2,40 metros de altura pues debía respetar la normativa vigente de circulación y no podía sobrepasar los límites de gálibo. El coste inicial no superaba los 5 millones de pesetas.



Fig.16: Teatro Ambulante Fuente: Fundación Emilio Pérez Piñero, Calasparra

### \_Maqueta experimental y montaje.

Una de las exigencias del ministerio era la solución eficaz del montaje y del transporte, para ello se diseñó la unión de las barras. Se buscaba un fácil montaje y una rápida abertura del conjunto. En un principio planteó un sistema tradicional en el que el montaje de las barras fuera manual, posteriormente elaboró un sistema de unión de barras en el que todas girasen sin separarse de la estructura. El cierre y apertura de la construcción se podía realizar desde la parte inferior mediante un mecanismo encargado de separar y juntar los seis nudos centrales inferiores de la estructura. También se podía abrir colgando de los nudos con una grúa, levantando poco a poco hasta conseguir la forma deseada, al igual que sucede con la cúpula de Essen. Estos elementos de montaje y desmontaje otorgan rapidez y economía, pues se consigue

una estructura que no se deba descomponer en piezas para el transporte, además se resuelve el problema geométrico de articulación de barras, girando todas sin interferir entre ellas. Con estas articulaciones y los elementos de la estructura se soluciona el problema mecánico de rigidización de manera rápida y sencilla.

### \_Forma

Se optó por dos cúpulas de malla triangular, las esferas surgen en la naturaleza de forma natural. Si se observan las gotas de agua se ve como estas forman esferas pues buscan contener la menor superficie expuesta de agua posible, además las tensiones superficiales en las caras expuestas de la gota de agua tienden a disminuir hasta conseguir una esfera perfecta.

Por otra parte, la cúpula está formada por una malla espacial de triángulos, esto se denomina cúpula de Fuller o cúpula geodésica. Los triángulos aportan mayor rigidez al conjunto y aportan mayor facilidad de descomposición de la superficie curva.

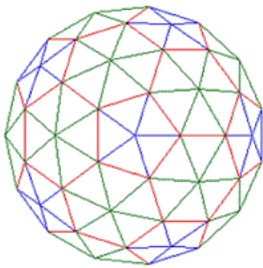


Fig.17: Cúpula Fuente: domosargentina.com

### \_Estructura

La estructura surge de la relación entre las distintas barras del conjunto, es decir, los triángulos al no variar de posición una vez rigidizada la estructura, pues esta es desplegable, se mantienen formando un conjunto. Este conjunto de piezas al ser estático forma la estructura, pues la estructura es un conjunto de formas estáticas.

Emilio Pérez Piñero, desarrolla un sistema estructural novedoso pues buscaba sencillez estructural y de montaje para poder transportar de forma cómoda y rápida la estructura. Por ello realiza un nudo capaz de conseguir que todas las barras unidas a él, 6 barras, giren para poder desplegar la estructura. Estas barras encargadas de formar triángulos al desplegarse consiguen que la estructura pase a ser un bloque ligero fácil de transportar. (García Martínez, M (2015)).

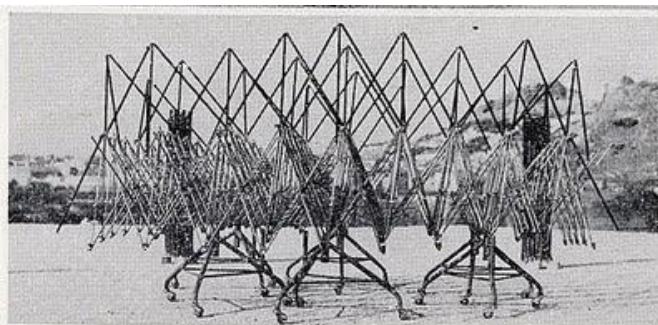


Fig.18: Módulos teatro ambulante  
Fuente: Fundación Emilio Pérez Piñero, Calasparra

### \_ Relación forma y estructura

Como se ha mencionado en el punto anterior se desarrolla una cúpula geodésica por la facilidad de descomposición de la esfera en elementos triangulares, de esta forma se aumenta la rigidez respecto de una cúpula formada por hexágonos. Por tanto, los hexágonos son formas más fáciles de construir, pero los triángulos otorgan mayor rigidez al descomponer en piezas más pequeñas las estructuras. Si nos fijamos en la naturaleza muchas formas están compuestas por la composición de triángulos, dando otros polígonos de tamaño mayor.

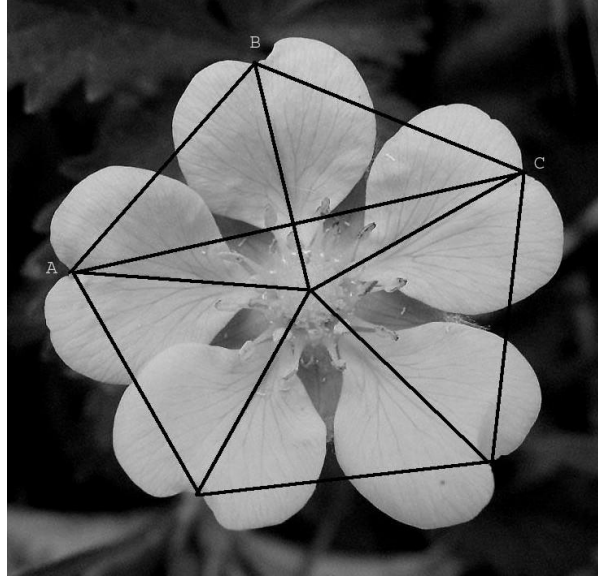


Fig.19: Teatro Ambulante Fuente: Fundación Emilio Pérez Piñero, Calasparra

Fig.20: Flor, geometría natural. Fuente: Fabiola Eme. Wordpress.com

### II.2.3 RELACIÓN CÚPULA DE ESSEN CON EL TEATRO AMBULANTE

Frei Otto y Emilio Pérez Piñero realizaron investigaciones en sistemas estructurales sencillos como es en el caso de las cúpulas, para que fueran estructuras simples con formas estáticas perfectas y que trabajasen a compresión. Como punto de partida de este análisis tenemos la forma exterior de ambos proyectos, a simple vista se observa una cúpula, estas se utilizan para cubrir grandes espacios sin soportes. Una cúpula es una semiesfera, la esfera es el volumen perfecto, pues con más espacio tenemos menos superficie. Por una parte, Frei Otto desarrolla cúpulas basadas en las solicitaciones que estas deben de absorber y por otra Emilio Pérez Piñero construye estructuras basadas en formas geométricas esféricas, como es el caso de la cúpula geodésica de la que tomó como ejemplo las cúpulas de Fuller.

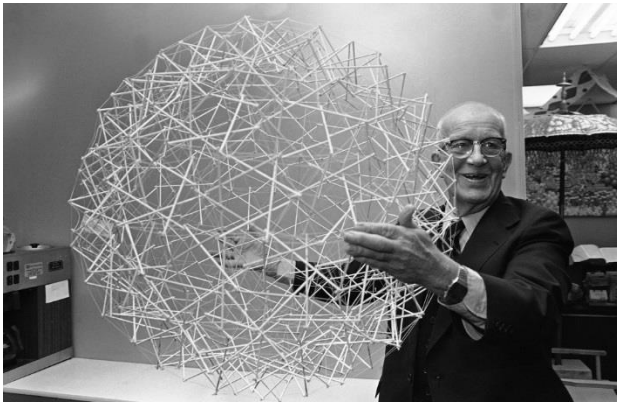


Fig.21: R.B Fuller y cúpula geodésica Fuente: [www.bfi.org](http://www.bfi.org)

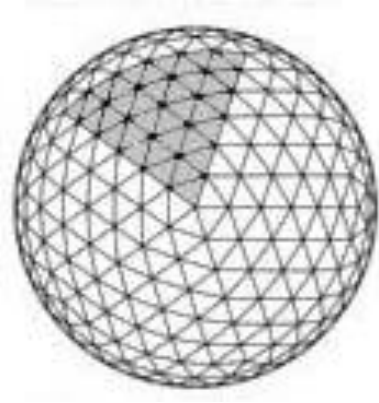
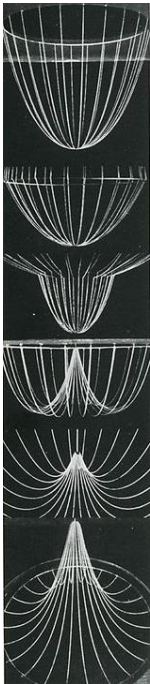


Fig.22: Cúpula geodésica Fuente: [www.ch-tch.ch](http://www.ch-tch.ch)



Las cúpulas de Frei Otto están curvadas en dos direcciones y se encuentran sometidas a flexión, sus cúpulas se construyen analizando las cargas que debe soportar y buscando una curvatura capaz de transmitir las por igual en toda la superficie, las formas de Frei Otto surgen gracias a procesos de autogeneración de la forma. Los ejes constructivos siguen con las directrices de la cúpula, por tanto, la superficie se construye con arcos paralelos a los ejes y no con la repetición de estos, mallas estructurales. Para el desarrollo de estas formas, utilizó modelos funiculares o de hilos suspendidos. (*Frei Otto: complete Works. P.211*).

El modelo funicular es aquel en el que los elementos que lo compone son flexibles y se encuentran cargados uniformemente y con trabajo a tracción, al ser suspendidos determinan la forma estética óptima, un arco con la curvatura necesaria para poder soportar las cargas aplicadas. En este arco uniformemente cargado, únicamente aparecen esfuerzos de compresión que siguen la curva de presiones obtenida con el modelo funicular. Este proceso se realiza mediante hilos, pero se pueden aplicar en a redes y superficies curvadas.

Fig.23: Formas funiculares Frei Otto Fuente: *Frei Otto: Estructuras*



### \_Trazado geométrico

Las cúpulas de Emilio Pérez Piñero surgen a partir de un trazado geométrico, se trata de cúpulas geodésicas, sus nervios siguen las líneas de tres conjuntos de círculos máximos que se cortan a 60 grados, dividiendo la cúpula en triángulos equiláteros. Los elementos triangulares son imprescindibles para poder curvar la superficie. El trazado de la cúpula geodésica se realiza con un icosaedro, pues es el cuerpo geométrico que más se asemeja a una esfera. Para conseguir una esfera a partir de un icosaedro se abaten las aristas desde el punto medio de estas, aumentando la cantidad de caras hasta conseguir una superficie casi continua.

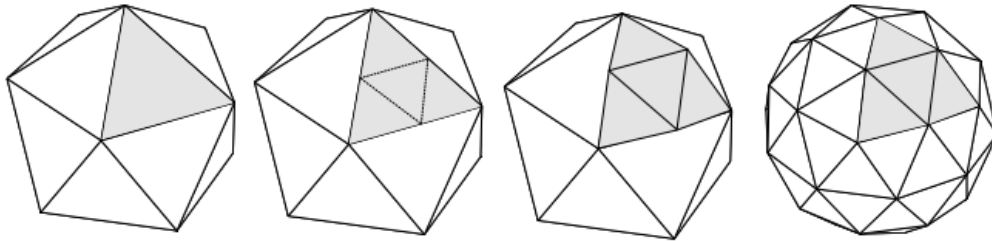


Fig.24: Cúpula a partir de un icosaedro Fuente: Grupo Peñascal

La curvatura de la cúpula geodésica es mayor cuanto mayor es la descomposición en triángulos del icosaedro, el tamaño de la cúpula se opone a las deformaciones impuestas. Cuánto más grande es la cúpula mayor resistencia a las cargas y mejor comportamiento y estabilidad. La cúpula geodésica combina la esfera como volumen que mejor reparte las fuerzas y el triángulo como elemento plano más resistente y menos deformable.

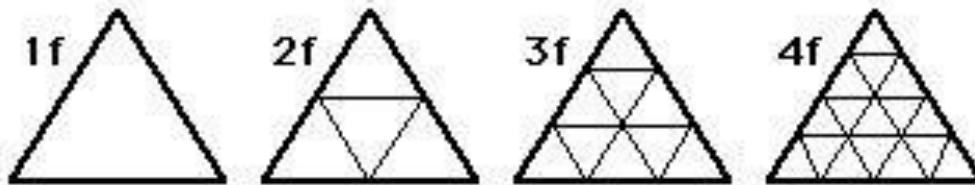
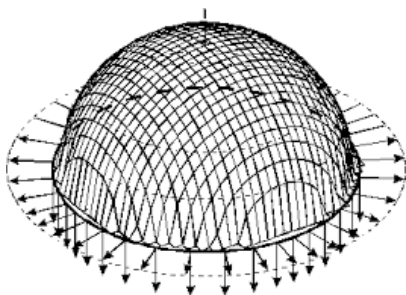


Fig.25: Descomposición de triángulos Fuente: Fundación Grupo Peñascal

### \_Esfuerzos de las cúpulas



La cúpula funciona con integridad tensional, es decir, cualquier incremento de tensión en un elemento de la estructura se transmite en todas las direcciones de esta forma se transmiten las cargas aplicadas y el peso propio entre toda la estructura, hay un reparto tensional en todos los puntos de la estructura, pues los nudos están todos conectados por las barras. Se equilibran tensiones de tracción y de compresión para que la estructura no colapse.

Fig.26: Integridad tensional Fuente: Fundación Frei Otto: Estructuras

### \_Diferencia entre las celosías

El tipo de celosía utilizado por cada arquitecto no es el mismo, en la cúpula de Essen encontramos una celosía formada por paralelogramos en el teatro ambulante aparece una celosía triangular. Pues Frei Otto consigue la celosía al colocar elementos paralelos a los ejes y Emilio Pérez Piñero utiliza una celosía triangular al tratarse de una cúpula geodésica. La triangulación de la estructura otorga mayor rigidez a la estructura, pues el triángulo es la forma básica indeformable y crea una malla espacial que evita la aparición de esfuerzos internos. Este tipo de estructuras reticulares trabajan como si se tratase de un tejido, pues las mallas espaciales no tienen elementos de arriostramiento lateral. Los tejidos naturales se adaptan a las sollicitaciones como es en el caso de las cúpulas de Frei Otto.

El cálculo de las mallas triangulares es más sencillo, pues se trata de triángulos equiláteros y la deformación es menor que en mallas cuadradas o hexagonales de nudos rígidos. Pero económicamente tienen un mejor resultado las mallas cuadradas, pues en mallas triangulares las barras sufren mayor pandeo ya que las fuerzas siguen la misma dirección que los elementos exteriores de la celosía.

### \_Ventajas

Como ventajas de las cúpulas tenemos la superficie, la distribución de tensiones, el coste y la resistencia de la esfera. Primero, la cúpula tiene más área perimetral que cualquier forma plana, de esta forma se puede cubrir más cantidad de espacio con menos material. La distribución de fuerzas proporciona mayor ligereza al conjunto pues al tratarse de mallas que siguen las curvas de tensión el material utilizado puede ser más liviano. El coste de estas es menor pues se necesita menos material que en cubiertas de membranas o en cáscaras de hormigón, pero la construcción de este tipo de estructuras es costosa pues durante el proceso de montaje el conjunto es débil. Y por último la esfera es la forma que mejor reparte las fuerzas pues estas siguen los arcos que la componen. (Fig.26)



### II.3.1 PABELLON JAPONÉS EXPO DE HANNOVER.

Shigeru Ban construyó un pabellón en forma de túnel curvo con tubos de papel para la exposición de Hannover, el tema era el medio ambiente y por ello se construyó con materiales ligeros con los que sacar el máximo rendimiento de los materiales locales disponibles. Esta enorme estructura debía reflejar la tradición japonesa y por eso se utilizó el papel como material principal para la construcción. Ban trabajó con Buro Hapold y Frei Otto en la creación de este proyecto, pues compartía las mismas ideas de ecologismo y construcción ligera que ellos.

El edificio cubría una superficie de 3600 metros cuadrados, medía 73.8 metros de longitud, 25 metros de ancho y 15.9 metros de altura, este ha sido la mayor estructura de tubos de papel realizada por Shigeru Ban.



Fig.27: Japanese Pavilion, grid shell Fuente: Frei Otto Complete Works

#### \_ Maqueta experimental y montaje

El pabellón final compuesto por una estructura de 440 tubos de papel de 12.5 centímetros de diámetro y una longitud máxima de 40 metros, los tubos se ataban con cintas de poliéster para que se asemejase a un panel. Las autoridades alemanas no permitieron que la estructura fuera sólo de tubos de papel y Ban tuvo que añadir una segunda estructura de arcos de madera que actuaba como refuerzo. (*Frei Otto: Complete Works, p. 345*).

Se trata de un proyecto experimental, porque se trabaja a partir de la deformación propia de los materiales. Son ellos los encargados de buscar las formas capaces de resistir las fuerzas, como sucede en la estructura de hilos. La maqueta que se desarrolló seguía un modelo funicular y estas formas son las que se transportaron a la estructura final del pabellón. La disposición de cables tras conseguir la forma final de la estructura se rigidizó para proporcionar resistencia.

El montaje se realizó en dos fases, por una parte, la estructura antes citada de hilos y tubos de papel reciclado y por otra la estructura de listones de madera. Tras el montaje de las redes de cables, se colocaron las vigas de madera que habían sido colocadas sobre un andamio, se levantó poco a poco el andamio hasta conseguir la forma curva final que seguía la forma obtenida con el modelo funicular. (*Frei Otto: Complete Works p.345*)

### \_ Forma

La estructura ondulada surgió a partir de un diseño paramétrico de doble curvatura, esta doble curvatura tiene partes cóncavas y partes convexas. Son el resultado de la incidencia de los vientos alemanes, así el pabellón mostraba el movimiento. Los 29 arcos que componían la edificación estaban escalonados, para producir mayor sensación de movimiento.

Esta forma natural, se asemeja a una silla de montar, se trata de una forma que busca la forma a través de un mínimo esfuerzo, se deforma siguiendo las líneas de mínima energía por ello es una forma natural. La silla de montar surge de presionar una superficie plana esta deforma buscando una forma fácil de conseguir donde los esfuerzos de presión estén compensados con las tensiones capaces de soportar el material. Este fenómeno se asemeja al citado anterior de los vientos alemanes, la forma del pabellón se ha determinado observando las presiones producidas en una superficie lisa. Según Heino Engel se trata de superficies de superficie activa, Gaudí las explica como superficies regladas.

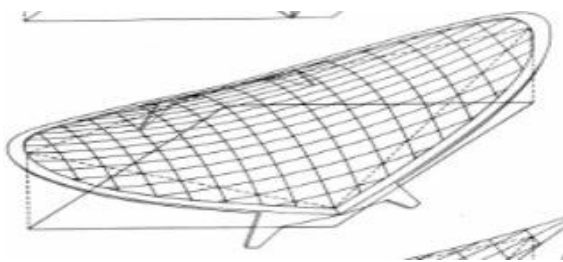


Fig.28: Superficie forma activa Fuente: *Sistemas de estructuras*

### \_ Estructura

La estructura del pabellón era la capaz de soportar las fuerzas internas, surge de la forma es decir es la representación final de las formas obtenidas tras someter los materiales a las presiones externas. Tras conseguir las formas se obtiene la estructura o conjunto de formas, que interactúan entre ellas hasta conseguir la estabilidad final.

Los elementos que forman la estructura pueden desarrollar distintas formas y por tanto distintas estructuras, como sucede en el pabellón pues con listones de madera y cables podemos conseguir muchas formas al combinarlos, la forma final conseguida es la forma idónea. Este fenómeno lo explica Frei Otto en uno de sus libros, IL 23:

“Various combinations are also possible, such as combinations of one and two-dimensional large elements (in the case of foil-covered lattices or grid shells)”  
(OTTO, Frei, IL 23: Structures. Form, force, mass. (p. 82) 1992)

### \_ Relación forma y estructura

El conjunto de curvas crea una forma final, un paraboloides hiperbólico. Por lo que la unión de elementos simples como listones de madera determinan una serie de curvas que al conectarse forman un paraboloides, es decir, se consigue una estructura eficiente y que representa el camino que siguen las fuerzas internas que recorren la estructura. Este fenómeno natural de autogeneración de la forma en cada tipo de cuerpo geométrico es distinto y por tanto, a pesar de ser espacios con las mismas características cada uno tiene una forma, como se observa en la forma final del pabellón y en la forma final de la cúpula de Essen ambos espacios deben ser cubiertos y son de materiales similares, además se ha llegado a la forma final con el mismo proceso experimental pero las fuerzas a soportar no son las mismas y por tanto la forma final varía.

Este es un claro ejemplo, de la actitud ecologista de Frei Otto. Se muestra la preocupación con el medio ambiente, la optimización de los recursos y el conocimiento de nuevas técnicas sostenibles de construcción. Además, el análisis de la estructura muestra la clara descomposición del pabellón en distintas formas, para conseguir un correcto funcionamiento de la estructura.

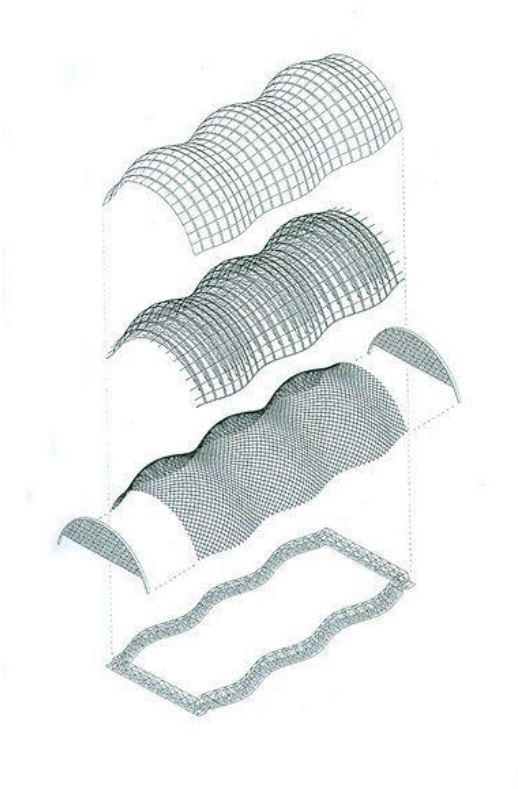


Fig.29: Estructura pabellón japonés Fuente: Frei Otto complete works

### II.3.2 VELODROMO DE ANOETA. (1971 San Sebastián)

Este proyecto nunca se llegó a realizar, fue una propuesta de Emilio Pérez Piñero al concurso convocado por el ayuntamiento de San Sebastián para la cubierta del velódromo de Anoeta. La muerte prematura de Emilio Pérez Piñero provocó que las autoridades nacionales solicitaran a Félix Candela que llevase a cabo el proyecto de su socio y amigo Emilio. Félix Candela aportó nuevas ideas, pero esta propuesta nunca se construyó. La cúpula estaba formada por dos familias transversales de arcos, los arcos máximos de la esfera estaban formados por la intersección de la esfera con dos planos de corte que pasaban por su polo, este hecho permitía realizar una cúpula de gran peralte manteniendo los arcos menos inclinados, otra implicación reconocida por Félix Candela:

*“en lugar de tener una división radial de la esfera, como es usual, en este caso quedan una especie de paneles cuyo único inconveniente es que no son cuadrados... cambian los ángulos y las longitudes de los paneles romboidal resultante... esto produce una complicación considerable pues todos los nudos son distintos”. (Félix Candela, Rueda de prensa 1975, hablando sobre el Cinerama tras la construcción del Palacio de los deportes, Méjico).*

#### \_ Maqueta experimental y montaje.

La arquitectura de Emilio Pérez Piñero se basaba en la experimentación con maquetas, por tanto, la única evidencia física que tenemos del proyecto son las maquetas que se realizaron para conseguir la forma final deseada. En las maquetas que se han conservado se ha podido analizar las familias de arcos. Desde el inicio del proyecto la retícula triangular y hexagonal se ha mantenido, pues los proyectos de este arquitecto utilizaban la triangulación como característica.

En las maquetas se observa el uso de distintos arcos hasta conseguir la forma adecuada, se trataba siempre de estructuras ligeras y eficientes en las que la forma surge de las maquetas y del análisis práctico de ellas. Las distintas maquetas buscaban la forma más eficiente cambiando el peralte de los arcos.



Fig.30: Maqueta velódromo Fuente: Fundación Emilio P. Piñero



### \_ Forma.

La división de la cúpula no es radial, pues la altura de ella no corresponde al valor de la semicircunferencia, aparecen elementos reticulares con dimensiones distintas entre ellos y una superficie con doble curvatura. Como solución a la retícula se propone una trama isótropa formada por tres tipos distintos de arcos, estos arcos crean triángulos equiláteros que es la forma geométrica más estable a nivel de deformación, pues se trata de una forma básica indeformable, asimismo se crean espacios hexagonales al combinarse las tres familias de arcos

Cabe destacar la importancia de las formas en este proyecto, pues en la naturaleza es común encontrar esferas formadas por hexágonos, como sucede en los panales de abejas pues con los hexágonos se consigue colocar el máximo número de elementos en un espacio reducido. Las formas triangulares se encuentran en la naturaleza, pero no tan visibles como las hexagonales, es decir, muchas formas naturales están compuestas por triángulos que a su vez forman otros polígonos. Las formas hexagonales también en las encontramos en procesos tan simples como al realizar pompas de jabón, si en una disolución jabonosa introducimos aire, este aire crea pompas que al estar en contacto unas con otras forman una malla hexagonal, pues al comprimirse buscan formas que ocupen menos.

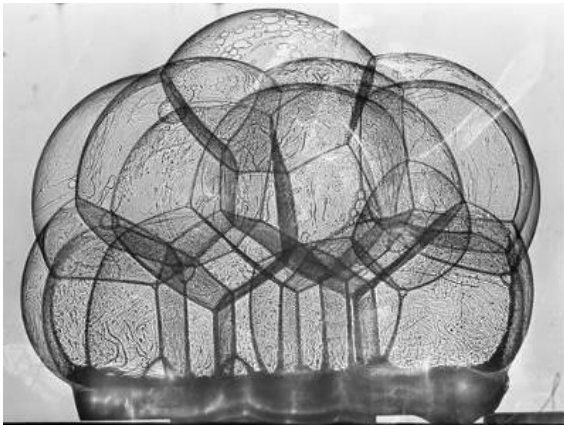


Fig.31: Pompas de jabón Fuente: Frei Otto, estructuras



Fig.32: Panal de abejas Fuente: es.123rf.com

### \_ Estructura.

Se han encontrado maquetas en las que varía el peralte de la estructura. En las maquetas con mayor peralte, aparecen familias de arcos centro en el polo de la esfera. En cambio, en las maquetas con menor peralte, la trama en la configuración de la estructura es más regular. Si la cúpula se rebaja, es decir, tiene menor peralte, los empujes son mayores pero el canto de los arcos puede disminuir. Dado que las líneas de empuje de las cargas de peso propio se estabilizan mejor con un arco rebajado y estarán más capacitados para asumir mayores sobrecargas asimétricas en la superficie del velódromo y la pérdida de estabilidad será menor.



Fig.33: Maqueta velódromo Fuente: Fundación Emilio P. Piñero

### \_ Relación forma y estructura.

Estos arcos se enlazan formando una superficie homogénea, esta malla esencial de triángulos y hexágonos proporciona una mayor rigidez pues la superficie actúa como una superficie lisa. El grado de división de la forma y el peralte de los arcos están relacionados con la longitud y la escala de los elementos resultantes de la retícula que compone estructuralmente la cúpula.

Por otra parte, hay que destacar la importancia de las formas en la celosía, pues estas a pesar de haber surgido de las necesidades del proyecto son formas eficientes y naturales. Se trata de formas que surgen del medio, en este caso han sido predeterminadas, pero no por diseño si no por conseguir mayor ligereza en el proyecto. Estas redes de elementos, en este caso celosías triangulares y celosías hexagonales, se asemejan a las redes de tejidos. Estas celosías son estructuras que han surgido del conjunto de hexágonos y triángulos, se podría decir que son distintas capas que finalmente forman un conjunto como sucede en el cuerpo humano, el conjunto de tejidos forma una estructura final, pues el conjunto de formas y elementos simples forman una estructura final, el velódromo. Esta similitud la explica Frei Otto en su libro IL 23, en el que explica:

*“Basically any living organism has an outer boundary consisting of a flexible skin. To this extent all living beings differ fundamentally from the objects of non-living nature and also from the majority of man-made objects.” (OTTO, Frei. Structures. For., Force, Mass. (p. 114) 1992)*

### II.3.3 RELACIÓN PABELLÓN JAPONÉS CON VELÓDROMO DE ANOETA

Gran parte de la extensa obra de Frei Otto trata de estructuras de doble curvatura realizadas con membranas textiles, por su gran capacidad de trabajo con poco espesor. Emilio Pérez Piñero también uso este tipo de cerramiento, pues además de resistencia al conjunto y protección, proporcionaba un fácil montaje y transporte.

#### \_ Superficies de doble curvatura

Estas membranas son estructuras traccionadas, no sufren problemas de pandeo o de flexión. La parte resistente de la estructura puede estar formada por listones de madera, cables, alambres etc. A pesar de que los elementos de la estructura no sean rígidos, una vez montada debe serlo para poder soportar las acciones sobre ella. Una estructura de cables o de membranas sin tensar bajo cargas de tensión se deformará y solamente se quedan planas si no se aplican fuerzas sobre ellas. Para evitar que se produzcan deformaciones se deben curvar las superficies, pues si se producen grandes deformaciones en las membranas, están provocarán fuertes tensiones en los soportes y en los anclajes. Esta curvatura se realiza en las dos direcciones, pues las cargas actuantes, como la carga de viento, no siempre se producen en la misma dirección, por tanto, la curvatura se debe corresponder a la dirección de las cargas exteriores aplicadas. Las superficies curvadas bidireccionalmente en dos sentidos son llamadas paraboloides hiperbólicos, anticlásticas o de curvatura negativa, según Gauss.

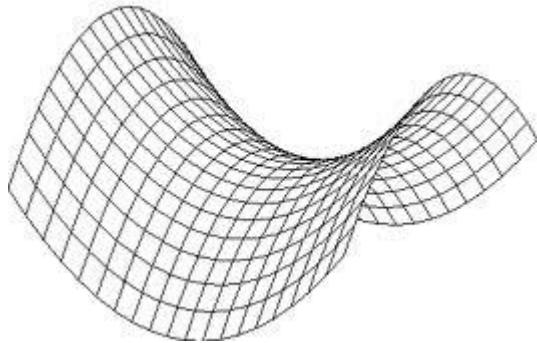


Fig.34: Superficie anticlástica Fuente: Apuntes estructuras II

En el velódromo de Anoeta, las membranas textiles se proyectaron para que pudieran cambiar su curvatura, tensando más o menos. El cambio de tensión provocaba mayor abertura para que entrase la luz. Esta es una gran ventaja de las superficies curvadas con peso propio muy pequeño, ya que la tensión a la que está sometida y la forma que adopta se mantienen constantes e inalterables, aunque la posición varíe.



Fig.35: Membranas velódromo Fuente: Fundación Emilio Pérez Piñero, Calasparra

En el pabellón de la Expo de Hannover los elementos de borde eran arcos continuos que trabajaban a compresión, pues se trata de los arcos de la estructura de madera, estos arcos estaban equilibrados por una red de cables que era la estructura principal de la estructura, la red formada por tubos de papel y cables. Analizando de forma estructural todo el conjunto, se podrían haber utilizado cables como elementos rígidos en el contorno, así se podría haber conseguido un ahorro de material. Esta postura era la que defendía Shigeru ante las autoridades alemanas. Las zonas de más altura son los encargados de absorber los esfuerzos de tracción.



Fig.36: Estructura pabellón Fuente:detail-online.com

#### \_ Celosías

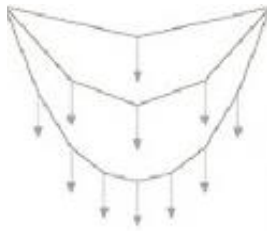
Ambas estructuras tenían como elemento rígido una celosía, en el caso del velódromo estaba formada por tres arcos de aluminio, en el pabellón japonés esta malla era de cables y papel, pero posteriormente se colocó una segunda celosía de madera laminada como cuerpo resistente del conjunto.

El pabellón de Shigeru Ban y Frei Otto, estaba compuesto por una retícula curvada de listones de madera y una red de cables. En la retícula curvada los listones de madera alcanzan un alto nivel de tensiones siendo estos cercanos a los valores máximos admisibles por el material. Sobre esta estructura es donde se tensa la membrana textil. Este tipo de estructura se llama "Gridshell", su forma se deriva de una superficie de doble curvatura. Lo más característico de este tipo de membrana es el perímetro, este debe ser muy rígido para poder soportar el peso muerto de la estructura y sobre todo las cargas que se asientan sobre él. Los elementos de borde son los encargados de transmitir las cargas a la cimentación. En el caso del pabellón, el perímetro se coloca directamente sobre la cimentación, pues la superficie curvada es continua.



### \_ Redes de cables y catenarias

Además, las redes de cables son apropiadas para estructuras de grandes luces, la distribución de los cables es regular, formando mallas con una geometría clara que ayude a una correcta distribución de tensiones. Las redes de malla uniforme como es el caso del proyecto analizado se construyen y se montan con facilidad, ya que las membranas tienen las mismas dimensiones en todas las direcciones. Cuando se deforma la malla, los ángulos entre cables varían según las tensiones transmitidas.



Los cables se deforman según catenarias al ser suspendidos por sus extremos, bajo la carga de su peso propio, la forma que consigue es de parábola. La forma del cable depende de las fuerzas de tracción y de los empujes en los apoyos, cuánto mayor sea la deformación mayor será la longitud del cable y por tanto se necesitará una menor sección de este. A más curvatura, más longitud del cable, si se mantienen las mismas cargas, la componente horizontal de las tensiones del cable será menor, por tanto, la tensión del cable será menor.

Fig.37: Catenarias Fuente: Teoría básica de las estructuras

### \_ Esfuerzos

La estructura rígida del velódromo se componía de tres anillos concéntricos que creaban una malla espacial, la cúpula con peralte es una estructura de barras con uniones articuladas. Su estructura de malla constaba de dos capas trianguladas superpuestas, dotaban de resistencia frente a deformaciones y por otra parte la forma esférica aportaba resistencia gracias a su geometría. Estas dos mallas triangulares, creaban una gran malla hexagonal que era el caparazón resistente del conjunto. La estructura también estaba creada por arcos paralelos a la directriz de la esfera, la densidad en la trama de arcos repercutía en la cantidad y en el tamaño de la malla hexagonal a cubrir.

Los empujes máximos y mínimos en los arcos se corresponden a los distintos puntos de los arcos. El empuje mínimo se corresponde a la línea de máximo peralte del arco, por el contrario, la línea del mínimo peralte es la que absorbe el empuje máximo.

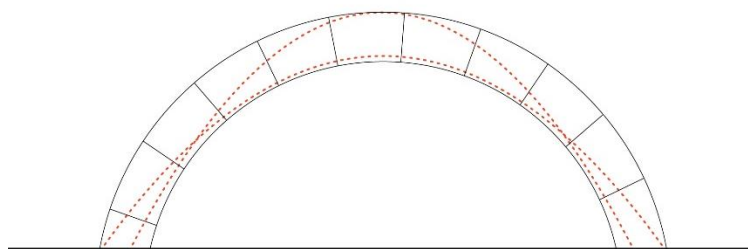


Fig.38: Peralte de los arcos Fuente: Teoría básica de las estructuras.

Por tanto, los dos proyectos contienen mallas encargadas de aportar la resistencia a deformación de la estructura. En cada caso, las mallas crean formas geométricas distintas. Ambos contienen arcos encargados de aportar mayor rigidez al proyecto, pues en el pabellón japonés no eran necesarios. Por último, ambos son curvos, por una parte, el pabellón de

Hannover no es una esfera, sino que se trata de una superficie de doble curvatura que si se analiza y descompone el resultado son varias esferas conectadas por una superficie alabeada, la forma curvada permite soportar la diferencia de esfuerzos que absorben la malla y los cables. El velódromo de Anoeta si es que es una esfera, con la curiosa característica de que los arcos que la componen sobrepasan el semicírculo, peralte.

#### \_ Estructuras mínimas

Estas obras son ligeras, pues los materiales utilizados tienen poco peso y espesor, pueden cubrir grandes espacios sin la necesidad de soportes. Sus estructuras son mínimas pues aportan todas las necesidades del proyecto con poca cantidad de material, en el caso del pabellón se usan materiales reciclados y que no sean nocivos para el medio ambiente, además el trabajo de montaje es fácil y de poco coste. Proporcionan un ahorro de energía pues su cerramiento deja pasar la luz, son membranas traslúcidas y proporcionan aislamiento térmico. Son ecológicas, dado que su construcción es reversible y se pueden desmontar con facilidad, los materiales y las estructuras son reutilizables y así pueden transformarse según las necesidades. Frei Otto define estructuras mínimas como:

*“Definimos como estructuras mínimas aquellas estructuras que cumpliendo con todas las necesidades que presentan los varios problemas constructivos de una obra real, necesitan la mínima cantidad de energía de construcción que su realización.” (OTTO, Frei, Frei Otto: Estructuras. Estudios y trabajos sobre la construcción ligera, Trad. Francesc Albardané, Barcelona).*

#### \_ Materialidad

Los materiales utilizados para el diseño orgánico de estos proyectos otorgan al conjunto una fuerte definición formal del proyecto. Crean espacios flexibles, donde es posible realizar distintas actividades sin que sea necesario cambiar la forma del lugar. Las posibilidades estéticas que aportan estos materiales no es la misma que la de los materiales tradicionales, se pueden realizar proyectos y soluciones estructurales imposibles de realizar con los materiales habituales.

#### \_ Ecologismo

Para Frei Otto, Shigeru Ban, Emilio Pérez Piñero y Félix Candela, entre otros, la relación de sus obras con el entorno era muy importante. Buscaban crear espacios sin deteriorar el medio ambiente, utilizaban pocos materiales, creaban grandes espacios con lo mínimo, pues se dedicaron a innovar y a experimentar con materiales para conseguir grandes resultados ahorrando energía y ahorrando materiales. Por eso, se les considera pioneros de la arquitectura sostenible. Sin embargo, las cúpulas de Frei Otto económicamente son más favorables que las realizadas por Félix Candela, pues la cantidad de material utilizada por Frei Otto es inferior a la utilizada por Félix Candela, además del uso de hormigón que tiene un coste más elevado que los materiales ligeros y las membranas textiles de Frei Otto.

**PROYECTO EXPERIMENTAL\_III**

CONSIDERACIONES PREVIAS \_III.1

PROCESO, HIPOTESIS DE MEJORA \_III.2

RELACION CON LOS AUTORES ESTUDIADOS \_III.3

### III.1 CONSIDERACIONES PREVIAS

El análisis anterior tanto de obras como de los postulados a tener en cuenta en el desarrollo de obras experimentales lleva a una serie de consideraciones previas que se deben tener en cuenta para construir estructuras ligeras. La estructura que se va a desarrollar a continuación surge de la idea de eficiencia y ligereza de las estructuras.

Por una parte, se busca una estructura capaz de montarse y desmontarse de forma rápida y económica. Actualmente la arquitectura desmontable se desarrolla en diversos escenarios arquitectónicos, el ámbito en el que más se desenvuelve es el escénico pues se precisan grandes espacios que se puedan transportar y con un gran aforo. El tipo de estructuras que se necesitan para estos espacios deben cubrir grandes superficies además de ser ligeras y simples en su montaje y transporte. Además, deben de conseguir una buena relación con el entorno en el que se van a colocar para que no causen impacto en el medio. Es por ello por lo que se propone una estructura ligera capaz de proporcionar una armónica relación con el espacio.



El estadio olímpico de Múnich de Frei Otto posee una visible relación con el espacio. Se trata de un velo tendido sobre la colina que no crea impacto sobre el parque en el que se encuentra.

*Fig.1: Estadio olímpico Fuente: Frei Otto Complete works*

Otro requisito es que los materiales que se vayan a utilizar deben de ser ecológicos y/o reciclados de esta forma además de no causar ningún impacto en el paisaje tampoco se creará contaminación. Desde mitad del siglo XX se utilizan membranas textiles para crear estructuras ligeras y desmontables. Este material además de aportar rigidez posee muy poco espesor por tanto es fácil de transportar. Los avances tecnológicos han ayudado a crear nuevos tipos de articulaciones para facilitar el montaje y desmontaje de estas membranas textiles. Según el estudio “Objetos a partir de la rigidización de estructuras de membrana” de Fernando Sierra y Ever Patiño Mazo, el cual se centra en la experimentación con maquetas de membranas elásticas expresa que: “[...] los mejores resultados con telas de Nylon puro y lycras. Pero finalmente se escogió la lycra, pues el Nylon tiene una elasticidad limitada.”

Las estructuras con membranas textiles dan mejores resultados estructurales pues se trata de membranas enganchadas a puntos firmes, esto proporciona ligereza y flexibilidad. Se trata de estructuras que adaptan su forma según sus propiedades físicas, estructuras funiculares. Por concluyente son superficies equilibradas que reparten sus cargas y su peso propio gracias a las tensiones superficiales, esta solución estructural trabaja a tracción y compresión.

Además, se precisan formas naturales. Formas que surjan a partir de la experimentación, por tanto, la forma final de la maqueta de estudio será la forma del proyecto. Esta forma natural se obtendrá a partir de fenómenos físicos, estos procesos como se ha anunciado previamente permiten formas en las que el material utilizado sea el mínimo, proporcionando tanto eficiencia como ahorro de material y económico. Estas formas, muestran estructuras óptimas pues adquieren la forma que el material permite para resistir las cargas.

Tras el análisis de formas realizado en las estructuras de Frei Otto y Emilio Pérez Piñero y tomando como ejemplo su forma de trabajo, se decide realizar una maqueta experimental con cuatro soportes fijos y una tela de lycra (media) para observar el comportamiento de la membrana y las formas que surgen al cambiar las alturas de los puntos de apoyo. La forma inicial de la membrana es un cuadrado pues de esta forma se pueden conseguir más combinaciones en los apoyos para observar las deformaciones de la estructura sometida a esfuerzos a tracción.



Asimismo, se tendrá en cuenta que la superficie que se cubra sea la máxima posible resistida por el material sin necesidad de aumentar la cantidad de ellos, se tendrá en cuenta el espesor de la membrana y que estos no son capaces de resistir cargas puntuales, pues se produce colapso local y una deformación excesiva en los puntos donde se aplican.

### III.2 PROCESO CONSTRUCTIVO.

La finalidad de este experimento es redescubrir las formas naturales, para ello se han utilizado materiales capaces de reproducir las fuerzas internas en la forma final de la maqueta. Se pretende buscar el equilibrio en los materiales y plasmarlo. De esta manera, se podrá analizar el comportamiento de la estructura y relacionarlos con lo estudiado en los puntos anteriores. Para el estudio de las membranas textiles se debe tener en cuenta que las tensiones en ellas son pequeñas y que el espesor de la membrana dependerá también de los momentos provocados por los apoyos, por tanto, el estudio de las fuerzas y la distribución de las tensiones es complicado de efectuar. En el punto anterior, se ha enunciado la necesidad de buscar la forma más eficiente posible con los materiales y requisitos anteriores. Asimismo, el proceso de búsqueda de la forma final está compuesto por distintas etapas en las que se busca cubrir la máxima superficie posible.

Como se ha explicado anteriormente la forma inicial del experimento es un cuadrado de membrana textil unido en sus cuatro extremos a hilos anclados a los soportes metálicos. Estos soportes son los encargados de aumentar o disminuir la altura del anclaje de la membrana para conseguir determinadas formas. La primera forma que se va a desarrollar y a partir de la cual han surgido las demás es un paraboloides hiperbólico, el cual se ha explicado en los puntos anteriores, se trata de una superficie de doble curvatura, la cual ha sido utilizada por muchos arquitectos para el desarrollo de cubiertas. Frei Otto denomina estas obras como “[...] *forma más sencilla de las estructuras laminares traccionadas.*” (OTTO, Frei. Frei Otto: Estructuras. Estudios y trabajos sobre la construcción ligera, Trad. Francesc Albardané, Barcelona. Editorial Gustavo Gili, S.A., Barcelona (p. 17, l.11)).

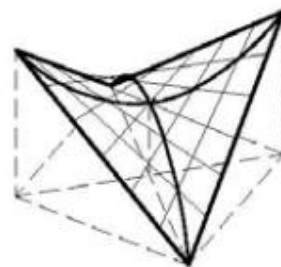
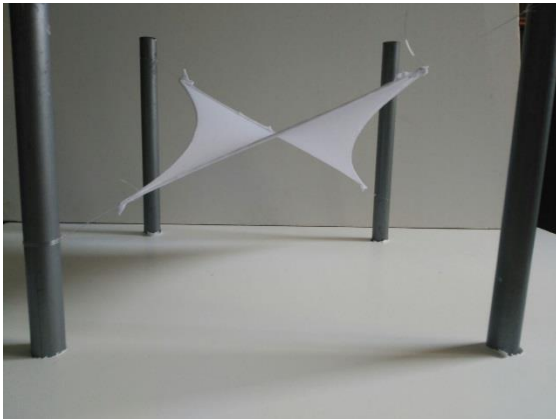


Fig.2: paraboloides hiperbólico Fuente: Frei Otto. Estructuras

Se trata de una forma muy simple que habitualmente se encuentra en la naturaleza, además se puede construir con líneas rectas. Su fácil construcción es gracias a que únicamente moviendo los extremos de la membrana se crean dos familias de curvas que son las encargadas de dar la forma. Se han desplazado dos vértices hacia abajo y los otros dos se han dejado en su posición inicial. Esta forma es la forma más eficaz que se puede construir con estos elementos básicos, pues al estirar los extremos de la membrana se crean esfuerzos a tracción que estabilizan la membrana sin necesidad de buscar elementos que arriostren la estructura.

El siguiente planteamiento de la estructura consiste en buscar una forma en la que la membrana de cubierta pueda formar parte del cerramiento lateral y que esta forma esté compuesta por una superficie mínima para que la estructura siga siendo eficiente. Para conseguir esta forma únicamente se han añadido anclajes en los laterales de la membrana de esta forma aparecen nuevos vértices que crean otro conjunto de curvas directrices. El área de membrana utilizada sigue siendo el mismo, pues así se observa como todo elemento tiende a simular la forma cuya superficie sea mínima.



Si se observa esta imagen vemos como al aumentar el número de anclajes la forma pasa a ser más compleja, pero al tener todos los puntos la misma altura, las curvaturas en los 4 cuadrantes en los que se puede dividir la estructura son las mismas. Este fenómeno solo se produce si las tensiones son las mismas en ambas direcciones pues de lo contrario la forma que adquiere no corresponde a la forma mínima, como surge en la siguiente imagen en la que una de las alturas de anclaje es mayor que la opuesta y por tanto la curvatura que se crea no es la misma en las dos direcciones. Este mismo efecto se produce si los anclajes de la membrana no se colocan de forma simétrica, pues al aparecer nuevos puntos de anclaje la curvatura de la pieza varía.

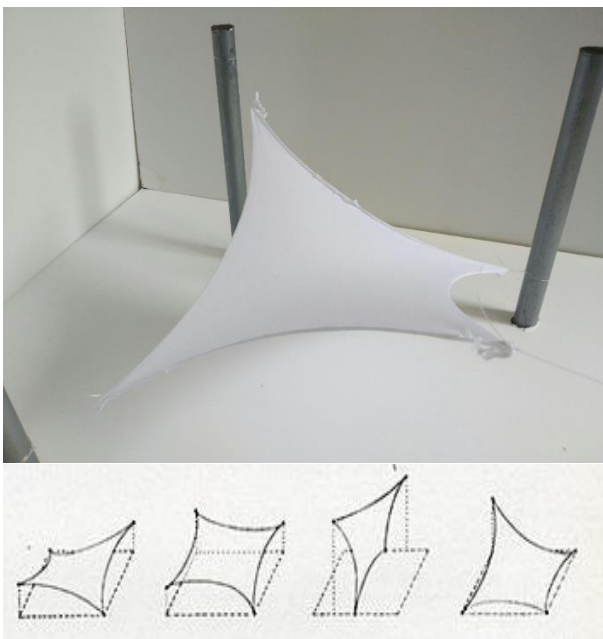
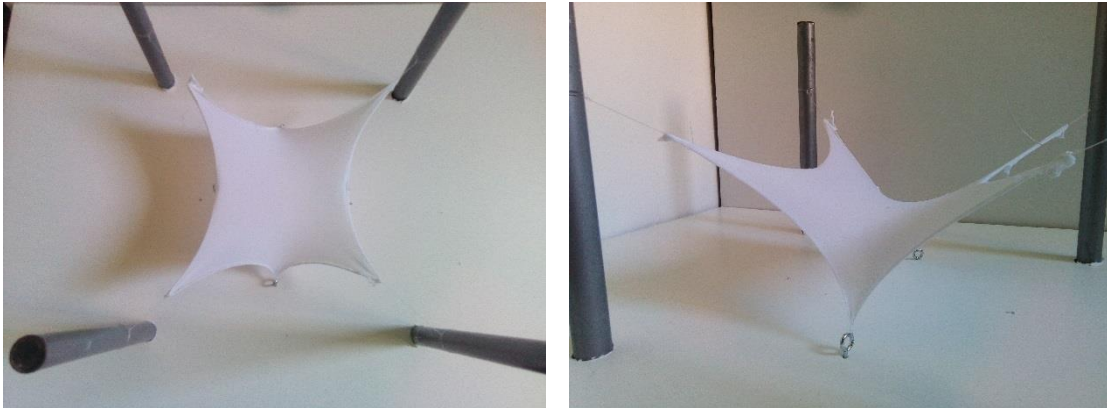


Fig.3: paraboloide hiperbólico Fuente: Frei Otto: Estructuras

Posteriormente, se ha decidido quitar dos anclajes laterales para poder cambiar la curvatura de la membrana. Pues se han elevado los extremos más altos de la membrana para aumentar la distancia entre anclajes. Cuanta más distancia entre anclajes mayor es la curvatura pues la altura de los extremos es mayor y por tanto la lycra está más traccionada.



Esta última estructura, no sería la más favorables, pues la distancia entre anclajes no es la misma en todas las direcciones y por tanto aparecen curvaturas distintas que provocan que la superficie obtenida no sea mínima. Por otra parte, cabe destacar la importancia de la altura de los puntos de anclaje cuánto más altos sean estos, mayor curvatura y por ello la forma obtenida será más favorable. Esto se debe a la tensión superficial que adquiere la membrana pues al estar sometida a grandes tensiones, al someter la estructura a grandes presiones esta no se desestabiliza y adquiere mayor resistencia y mayor equilibrio. Por último, cabe destacar que la cantidad de anclajes de la membrana también influye de forma positiva en nuestro experimento, pues conforme se añadían anclajes, mayor era la sujeción del conjunto y por tanto se conseguía una estructura más estable.



### III.3 RELACIÓN CON LOS AUTORES ANALIZADOS

El proyecto propuesto de forma experimental cumple las mismas características que las obras de Frei Otto y Emilio Pérez Piñero en cuando a sostenibilidad. La estructura que se ha descrito combina ambos estilos arquitectónicos. Por una parte, las formas alabeadas de Frei Otto y por otra parte la facilidad de montaje de Emilio Pérez Piñero. Se trata de una estructura fácil de ejecutar, de bajo coste y alto rendimiento, como sucedía en las obras de ambos arquitectos. Con ella se consigue una estructura eficiente capaz de ser usada en cualquier espacio. Por otra parte, la membrana textil aporta gran durabilidad y resistencia. No se trata de estructuras que sean desechables y por ello sigue los mismos pasos que el teatro ambulante de E.P. Piñero o los pabellones desmontables con materiales reciclados de Frei Otto.

La forma final ha surgido gracias a procesos naturales como sucede en las obras de Frei Otto y de Gaudí. Se ha experimentado con jabón y con hilos. Además, la forma final obtenida es una de las formas más características de las obras de Frei Otto, pues se trata de una estructura alabeada bidireccionalmente, es decir, un paraboloide hiperbólico. El velódromo de Anot de E.P. Piñero también se proyectó con paraboloides hiperbólicos en su cubierta, pero la forma de ellos no surgió como respuesta a las fuerzas internas de la estructura, sino que se eligió esta forma por la facilidad de cambio que tiene. En estos proyectos la membrana textil además de buscar estabilidad y proporcionar rigidez al conjunto, otra función es la de proteger del sol.

Las tecnologías modernas, han desarrollado grandes avances en la composición de las membranas textiles, para mejorar sus propiedades y sobre todo la protección solar que estas aportan, ya que es un tema muy notable en la sociedad actual. Recientemente se han desarrollado nuevos tejidos formados con fibras de PVC y tejidos de poliéster que facilitan la curvatura de las membranas. Estos nuevos materiales permiten una mejor limpieza, mejor resistencia a punzonamiento. Cuando se efectúa un corte en una membrana textil esta tiende a rasgarse siguiendo la dirección de las fibras hasta llegar a un punto en el que esta dirección cambie. Las membranas actuales llevan materiales de refuerzo para evitar este tipo de deterioro.

Todas las obras de los arquitectos analizados y el pequeño proyecto que se ha proyectado tienen en común la ligereza de todos los materiales utilizados. Si esta propuesta de proyecto se fuera a realizar los soportes, los cuales trabajan a compresión, serían de acero pues se trata de una estructura de fácil montaje y la importancia del coste también es un punto importante a estudiar. Este material proporciona rigidez y eficacia en cuanto al montaje y durabilidad.

Por último, algunas estructuras analizadas y la estructura de la propuesta están compuesta por cables. Hoy en día, el uso de cables en el mundo de la construcción cada vez es más utilizado pues se trata de elementos de peso propio reducido y económicos. Además, a nivel de seguridad los cables se van deteriorando poco a poco y por ello es más fácil reemplazarlos antes de que se produzca su rotura. En resumen, la estructura propuesta pertenece a un gran campo en el que desde hace más de 60 años se lleva trabajando. Las nuevas tecnologías y la capacidad de innovación de la sociedad permiten que este campo de aplicación sea cada vez mayor y que las estructuras ligeras tengan mayor importancia y uso en la actualidad.

## CONCLUSIONES\_IV

CONCLUSIÓN DE LA INVESTIGACIÓN\_IV.1

CONCLUSIÓN DE LAS OBRAS ANALIZADAS\_IV.2

CONCLUSIÓN DEL PROYECTO EXPERIMENTAL\_IV.3

## IV.1 CONCLUSION DE LA INVESTIGACIÓN

Tras esta revisión sobre las formas, la estructura y la arquitectura ligera tanto en territorio nacional como internacional hasta la actualidad se comprueba la influencia del avance tecnológico en el campo de la arquitectura e ingeniería. En la segunda mitad del siglo XX surgió el concepto de arquitectura sostenible gracias a estos arquitectos, desde 1960 la arquitectura sostenible cada vez va cogiendo más fuerza.

La revisión ha procurado aclarar los aspectos más importantes para conseguir una percepción clara del concepto de forma y estructura, dado que son los puntos clave en los que se centra la investigación. El concepto de forma y estructura ha sido de gran interés por muchos arquitectos, teóricos, matemáticos etc., a lo largo de la historia, pues se formaliza con la geometría y el estudio de ella.

Este primer estudio ha servido para conocer con más detalle los procesos de generación de forma y su relación con el entorno cotidiano. Además de descubrir la relación entre la naturaleza y las formas. Es importante destacar el estudio de estos procesos naturales en los que se muestran las leyes físicas en las que se rige la naturaleza. Pues con ellas se han determinado muchas obras arquitectónicas de gran importancia cultura, como el caso de la Sagrada Familia en Barcelona, de Antonio Gaudí. Estos procesos de generación de la forma han sido estudiados tanto de forma teórica como de forma práctica. Estas prácticas experimentales en el mundo de la construcción han aportado grandes estructuras y una nueva visión del espacio.

El estudio de las formas y de los materiales ha influido de forma notable en la concepción de la arquitecta, gracias a esta nueva forma de pensar y al contexto histórico en el que se desarrollan, contribuyeron a abrir el largo camino del mundo sostenible y eficiente en el que actualmente se sigue trabajando. Hoy en día es más común este tipo de arquitectura ligera y sostenible, la preocupación del medio ambiente y la contaminación ambiental son problemas sociales que hay que tener en cuenta a la hora de proyectar, con estos arquitectos que empezaron a estudiar la simplicidad de las formas y las estructuras eficientes se inicia una nueva etapa arquitectónica de gran interés sociocultural.

## IV.2 CONCLUSIÓN DE LAS OBRAS ANALIZADAS

Los autores que se han analizado, Frei Otto y Emilio Pérez Piñero, son grandes referentes de la arquitectura ligera y eficiente. Frei Otto, teórico y arquitecto alemán, pionero de la arquitectura sostenible. Emilio Pérez Piñero, arquitecto español, precursor de la arquitectura plegable. A simple vista sus arquitecturas parecen distintas, pero ambos trabajaron con elementos flexibles y ligeros, pensaron en cómo aplicar las leyes físicas de la naturaleza en su arquitectura para que esta fuese más fácil de concebir.

Con las obras analizadas se ha podido estudiar con detalle la relación directa entre forma y estructura. Pues se trata de proyectos en los que la forma final ha sido estudiada y ensaya sin haber sido predeterminada desde el principio. Por una parte, se ha desarrollado el concepto de cúpula geodésica y su aplicación en la arquitectura. Por otra parte, se ha estudiado el concepto de mallas espaciales y como su composición determina una forma u otra de trabajo, como sucede al estudiar la malla triangulada y la malla realizada con cuadriláteros. La concepción de la forma en estas estructuras es el punto de partida, pues sin su forma perfecta la estructura no sería capaz de trabajar de forma eficiente y no se trataría de construcciones óptimas y sostenibles.

Otro punto importante a tratar es la capacidad de cambio de los espacios y el fácil montaje y desmontaje de estos. En estas obras la importancia del montaje y transporte ha sido una premisa para el desarrollo del proyecto, además de conseguir con más rapidez su construcción se premia la posibilidad de cambio del interior, pues forman grandes espacios en los que se puedan realizar distintas actividades sin necesidad de cambiar la estructura de proyecto.

La aplicación de las membranas textiles es también una característica común de esos proyectos. El estudio de tensoestructuras, tanto membranas textiles como redes de cables, ha facilitado el aprendizaje y estudio de la relación entre la forma, la masa y las fuerzas internas que se producen en los cuerpos para dar una estructura eficiente. Esta estructura eficiente es capaz de sostenerse por si misma utilizando la menor cantidad posible de material y sin necesidad de ser rigidizada para soportar las cargas aplicadas sobre ella.

Para finalizar cabe destacar que con Frei Otto y Emilio Pérez Piñero, se entró en una etapa en la que la arquitectura sostenible tanto a nivel estructural como a nivel de eficiencia energética son las bases para construir en la actualidad. Asimismo, cada vez es más común la construcción de elementos montables y desmontables, donde la ligereza y el bajo coste sean requisitos del proyecto.

### IV.3 CONCLUSIÓN PROYECTO EXPERIMENTAL

El estudio de las formas y de las obras comparadas tenía dos finalidades. Por un lado, conocer los fundamentos teóricos de la estructura a partir de la forma y de la materia, además de ver su aplicación en obras tanto ensayadas como construidas. Por otro lado, aplicar este estudio en un proyecto experimental, donde poder solucionar una estructura con membrana textil utilizando la menor cantidad de material y una forma simple como un cuadrado anclado en sus cuatro vértices, aplicando los fenómenos físicos estudiados y las mejores formas para desarrollar una estructura fácil de montar y sostenible.

Con este proyecto experimental se ha estudiado la capacidad de adaptación de las membranas textiles, además se ha observado como a partir de una forma tan simple como un cuadrado se pueden conseguir formas alabeadas más estables que las iniciales. Asimismo, se ha podido establecer una serie de criterios para llegar a una estructura eficiente en la que se utilizase menos cantidad de materiales. Pues se han estudiado distintas propuestas con los mismos materiales iniciales hasta conseguir la estructura más estable posible con los materiales utilizados y las premisas iniciales del proyecto. También, se ha investigado sobre materiales para poder conseguir un buen resultado, pues la rigidez del material influye en la forma final. Los materiales más rígidos tienen un peor comportamiento frente a esfuerzos de tracción y por ello no eran una elección idónea. Además, era necesario un material lo suficiente elástico para poder conseguir formas muy curvas, dado que cuánto mayor era la curvatura mayor era la estabilidad del conjunto.

Se destaca como punto importante del ensayo, la capacidad de cambio de los cuadrados, como una forma tan simple como esta puede desarrollar superficies regladas únicamente cambiando los puntos de anclaje y añadiendo nuevos puntos. Además, tras desarrollar la maqueta, se ha podido observar con detenimiento que las superficies alabeadas simples, como el paraboloide hiperbólico inicial no son adecuadas para cubrir grandes espacios pues se necesitaría una gran altura de los puntos de anclaje para conseguir rigidez y estabilidad.

Para concluir, esta ha sido una aproximación más a las tensoestructuras, ya que el estudio teórico y de proyecto se debía de plasmar en un proyecto material propio para así poder establecer una serie de ideas en común a las de los arquitectos que han estudiado y trabajado en las estructuras ligeras desde mitad del siglo XX.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

## \_ARTÍCULOS

Becerra, Lomonaco, Tessore. (2011). *Frei Otto. Diseño Arquitectónico y Estructural*. FCEIA.

BURKE, E. (1757) *Indagación filosófica sobre el origen de nuestras ideas acerca de lo sublime y lo bello*, Trad. Juan de la Dehesa, Valencia. Colección de Arquitectura 19, 1985, p.110, Ed. Original, London.

Calvo, J. Sanz, J.P. (2011). "Arquitectura plegable para una época prodigiosa. La obra de Emilio Pérez Piñero y la arquitectura de los años sesenta". *EGA-Revista de expresión gráfica*. 114,14. Ediciones generales de la UPV. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/14824/888-1864-1-PB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Churtichaga, J.M. (). *La estructura veloz, a propósito de la obra de Emilio Pérez Piñero y Félix Candela*. [http://www.chqs.net/archivos/informes/archivo\\_1\\_040310\\_la+estructura+veloz.pdf](http://www.chqs.net/archivos/informes/archivo_1_040310_la+estructura+veloz.pdf)

Patiño, E. (2005) *El estudio de la forma desde la dimensión material. Fundamentación conceptual de la línea de investigación en Morfología Experimental*. Colombia.

Pérez Belda, A., Pérez Almagro, M.C., (2016). "La arquitectura desplegable conmemora las XXV años de paz. 50 aniversario del Pabellón de Emilio Pérez Piñero." *EGA-Revista de expresión gráfica*,146,10. Ediciones generales de la UPV. <https://riunet.upv.es/handle/10251/76574>

Sierra, F., Patiño, E. (2005). "Objetos a partir de la rigidización de estructuras de membrana" en ponencia presentada en el II Simposio Latinoamericano de Tenso Estructuras. Caracas, Venezuela. 10.

Songel Gaonzalez, J.M. (2010). "Frei Otto y el debate sobre la génesis de la forma arquitectónica". *EGA-Revista de expresión gráfica*, 15, 8. <https://riunet.upv.es/handle/10251/14810>

Songel Gonzalez, J.M. (2013). "De Goethe a Frei Otto: un itinerario romántico en busca de las formas de la vida y sus fuerzas generadoras en la naturaleza y en la técnica". Ediciones generales de la UPV. <https://riunet.upv.es/handle/10251/43994>

Tejera Parra, J. (2010) Construir con membranas. *Tectonica* 36.

## \_LIBROS

Heino E. (Ed.) (2001) Rapson, R. (Trad). (2006). *Sistemas de estructuras*. Barcelona: Gustavo Gili, D.L

Heyman, J. (Ed) (2011) Instituto Juan Herrera (Trad.) (2011). *Teoría básica de las estructuras*. Barcelona: Ed. Reverte

Meissner, I. & Möller, E. (Ed.). (2015). *Frei Otto a life of research construction and inspiration*. München: Detail.

Nerdinger, W. (Ed.). (2005). *Frei Otto Complete Works*. Basel: Birkhäuser.

Otto, F. (Ed.) Albadarné, F. (Trad). (). *Frei Otto: Estructuras*. Barcelona: Gustavo Gili, S.A.

Otto, F. (Ed). (1988). *IL 22 Form*. Stuttgart: University of Stuttgart

Otto, F. (Ed). (1992). *IL 23 Structures*. Stuttgart: University of Stuttgart

Otto, F. (Ed). (1990). *IL 25 Experiments*. Stuttgart: University of Stuttgart

\_PÁGINAS WEB

[www.arch.structure.com](http://www.arch.structure.com)

[www.archadaily.com](http://www.archadaily.com)

<http://www.architectmagazine.com/firms/atelier-frei-otto-warmbronn>

[www.artofmanliness.com](http://www.artofmanliness.com)

[www.bfi.org](http://www.bfi.org)

[www.ch-tch.ch](http://www.ch-tch.ch)

[www.designkultur.wordpress.com](http://www.designkultur.wordpress.com)

[www.detail-online.com](http://www.detail-online.com)

[www.domosargentina.com](http://www.domosargentina.com)

[www.es.123rf.com](http://www.es.123rf.com)

[www.fabiolaeme.wordpress.com](http://www.fabiolaeme.wordpress.com)

[www.floornature.es](http://www.floornature.es)

[www.fundaciónantoniogaudi.org](http://www.fundaciónantoniogaudi.org)

[www.inhabitat.com](http://www.inhabitat.com)

[www.perezpinero.org/](http://www.perezpinero.org/)

[www.puentemania.com](http://www.puentemania.com)

[www.sanahujapartners.com](http://www.sanahujapartners.com)

[www.scopnest.com](http://www.scopnest.com)

\_TESIS

García Martínez, M. (2015). *Arquitectura experimental en España 1965-1985*. Tesis. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. <http://oa.upm.es/39986/>

Songel Gonzalez, J.M. (2005). *Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart: una experiencia de metodología, investigación y sistematización en la búsqueda de la forma resistente*. Tesis. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. <https://riunet.upv.es/handle/10251/2346>

\_VIDEOS

YOUTUBE, "FREI OTTO - MODELING WITH SOAP FILMS" en youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=-IW7o25NmeA>

YOUTUBE, "Soap Experiment - Sacred Form Stage 1 Form-finding" en youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=9eU13L9mosk>

