



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA

Departamento de Composición Arquitectónica

TESIS DOCTORAL

Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de
Stuttgart: una experiencia de metodología,
investigación y sistematización en la búsqueda de la
forma resistente

Presentada por: Juan María Songel González

Dirigida por: Cecilio Sánchez-Robles Beltrán

Valencia, Mayo de 2005

ÍNDICE

I. Introducción.	11
I.1 Consideraciones previas. Estado de la cuestión.	13
I.2 Objetivos, metodología y fuentes.	17
II. La tradición de los ingenieros en la búsqueda de la forma resistente con nuevos materiales a lo largo del siglo XX.	21
II.1 El desarrollo de nuevos materiales a partir de la Revolución Industrial y la nueva profesión de ingeniero civil.	23
II.2 La integración entre estructura y forma y la sensibilidad estética del siglo XX.	25
II.3 Algunos ejemplos de esta tradición.	
II.3.1. Robert Maillart (1872-1940).	31
II.3.2. Eugène Freyssinet (1879-1962).	37
II.3.3. Eduardo Torroja (1899-1961).	41
II.3.4. Eladio Dieste (1917-2000).	46
III. Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart. El desarrollo de una experiencia metodológica e investigadora en la búsqueda de la forma resistente.	55
III.1 Biografía de Frei Otto	63
III.2 Obras y proyectos.	69
III.3 Antecedentes experimentales y metodológicos en la formación de Frei Otto.	88
III.4 Antecedentes del " <i>Institut für leichte Flächentragwerke</i> " (IL, Instituto de Estructuras Ligeras) de Stuttgart.	104
III.4.1. El " <i>Entwicklungsstätte für den Leichtbau</i> " (EL, Centro para el desarrollo de la construcción ligera) de Berlín	105
III.4.2. El grupo de investigación " <i>Biologie und Bauen</i> " (Biología y Construcción).	110

III.5 La fundación del " <i>Institut für leichte Flächentragwerke</i> " (IL, Instituto de Estructuras Ligeras) de Stuttgart.	121
III.5.1. Participación en programas de investigación gubernamentales.	129
III.5.1.1. El programa de investigación SFB 64 " <i>Weitgespannte Flächentragwerke</i> " (Estructuras de grandes luces).	131
III.5.1.2. El programa de investigación SFB 230 " <i>Natürliche Konstruktionen</i> " (Estructuras naturales)	138
III.5.2. La metodología experimental y la búsqueda de la forma resistente: sistematización de los procesos físicos de autogeneración de la forma.	148
IV. Frei Otto y la sistematización de la forma.	167
IV.1 El tamaño absoluto.	173
IV.2 La forma positiva y la forma negativa. Sólidos y cavidades.	175
IV.3 Las dimensiones relativas. Las proporciones.	177
IV.4 Los objetos uni-, bi- y tridimensionales.	179
IV.5 La superficie.	182
IV.6 Mono-, di- y poliedros.	183
IV.7 Las formas compuestas. Partes y elementos.	186
IV.8 La génesis de la forma y los mundos de formas.	188
IV.9 Variabilidad y movilidad de las formas.	193

V. Frei Otto y la sistematización de la estructura.	195
V.1 Clasificación de 1963 / 1964.	199
V.2 Clasificación de 1992.	204
V.2.1. Estructuras unidimensionales.	205
V.2.2. Estructuras bidimensionales o superficiales.	211
V.2.2.1. Estructuras bidimensionales o superficiales traccionadas.	214
V.2.2.2. Estructuras bidimensionales o superficiales comprimidas.	216
V.2.2.3. Estructuras superficiales traccionadas y comprimidas.	217
V.2.2.3.1. Superficies planas	218
V.2.2.3.2. Superficies de simple curvatura	218
V.2.2.3.3. Superficies sinclásticas en forma de cúpula.	218
V.2.2.3.4. Superficies anticlásticas en forma de silla de montar.	218
V.2.2.4. Estructuras superficiales sometidas a flexión.	220
V.2.3. Estructuras tridimensionales.	223
V.2.3.1. Estructuras tridimensionales traccionadas.	224
V.2.3.2. Cavidades.	225
V.2.3.3. Redes tridimensionales traccionadas.	227
V.2.3.4. Estructuras neumáticas.	227
V.2.4. Otras estructuras.	229
V.2.5. Estructuras de la naturaleza.	231
V.2.6. Estructuras de la técnica humana.	232

VI.Frei Otto y la catalogación de nuevos tipos estructurales como exploración gráfica y experimental de nuevas combinaciones y relaciones.	235
VI.1 Las estructuras de redes.	240
VI.1.1. Categorías de la clasificación	241
VI.1.2. Elemento de red “cable”.	242
VI.1.3. Elemento de red “punto de suspensión”.	243
VI.1.4. Elemento de red “nudo”.	243
VI.1.5. Elemento de red “malla”.	244
VI.1.6. Elemento estructural “red”.	245
VI.1.7. Elemento estructural “borde de red”.	250
VI.1.8. Elemento estructural “soporte de red”.	252
VI.1.9. Elemento estructural “anclaje”.	254
VI.1.10. Formas de redes.	256
VI.1.11. Variaciones, adiciones y combinaciones de redes con formas alabeadas.	259
VI.1.12. Variaciones, adiciones y combinaciones de redes formando superficies onduladas.	260
VI.1.13. Variaciones, adiciones y combinaciones de redes soportadas por arcos.	261
VI.1.14. Croquis de proyectos de sistemas completos de estructuras de redes.	262

VI.2	Las cáscaras o bóvedas de celosía de capa única.	265
VI.2.1.	Antecedentes experimentales desarrollados por Frei Otto y sus colaboradores.	269
VI.2.2.	El pabellón para la " <i>Bundesgartenschau</i> " de 1975 en Mannheim.	276
VI.2.3.	La red de malla uniforme y cuadrada como base para la clasificación y exploración del mundo de las formas de las bóvedas de celosía.	282
VI.2.4.	Los elementos generadores de la forma.	285
VI.2.4.1.	El desarrollo ortogonal.	285
VI.2.4.2.	La suspensión.	286
VI.2.5.	Clasificación de las formas suspendidas.	289
VI.2.5.1.	Redes colgadas verticales.	292
VI.2.5.2.	Redes con borde rígido dividido en dos partes.	294
VI.2.5.3.	Redes con borde rígido abierto.	298
VI.2.5.4.	Redes con borde rígido cerrado.	299
VI.2.5.5.	Redes con borde flexible.	303
VI.2.5.6.	Redes con aristas abiertas.	305
VI.2.5.7.	Redes con aristas cerradas.	309
VI.2.5.8.	Redes con puntos de suspensión interiores.	310
VI.2.5.9.	Redes compuestas.	317
VI.2.5.10.	Redes colgadas con solapes.	318
VI.2.5.11.	Redes extendidas por barras comprimidas.	320
VI.2.5.12.	La catenaria erguida en la red colgada.	325
VI.2.5.13.	El ojo en la red.	326
VI.2.6.	Posibilidades de las bóvedas de celosía para la arquitectura.	328

VII. Conclusiones	347
VIII. Epílogo	359
IX. Bibliografía	381
IX.1 Sobre la relación entre forma y estructura.	383
IX.2 Frei Otto como autor o editor de libros.	388
IX.3 Monografías sobre Frei Otto.	390
IX.4 Publicaciones del " <i>Entwicklungsstätte für den Leichtbau</i> ".	392
IX.5 Publicaciones del " <i>Institut für leichte Flächentragwerke</i> "	394
X. Apéndice documental	399
X.1 Entrevista con Frei Otto.	401
X.2 Entrevista con Jürgen Henniscke.	467
X.3 Gespräch mit Frei Otto.	480

I. Introducción.

I.1. Consideraciones previas. Estado de la cuestión.

La finalidad de este trabajo de investigación que proponemos como tesis para la obtención del grado de doctor es la reconsideración de la aportación de Frei Otto a la arquitectura desde la reflexión teórica y la experiencia metodológica e investigadora por él realizada en estrecha cooperación con los colaboradores del *Institut für leichte Flächentragwerke* (Instituto de Estructuras Ligeras), por él fundado y dirigido, en la Universidad de Stuttgart. Planteamos como tesis la plena vigencia de su experiencia y su reflexión teórica, alejada de los planteamientos del *high tech*, al que tradicionalmente ha quedado asociado por la crítica, y proponemos su consideración en el contexto de la reflexión sobre la búsqueda de la adecuación entre el material y la forma resistente, que ha caracterizado a los ingenieros más innovadores en la creación de formas con los nuevos materiales del siglo XX.

Este trabajo de investigación tiene su origen más remoto en la experiencia docente desarrollada al impartir las asignaturas "Arte y estética de la ingeniería civil" y "Composición II" en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, y en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura, respectivamente, ambas de la Universidad Politécnica de Valencia. Como consecuencia de esta experiencia he tenido la oportunidad de conocer la obra y la reflexión teórica de los ingenieros al afrontar el diseño de las obras públicas con los nuevos materiales que la industria ha ido poniendo a su disposición. La importancia que la

componente científica tiene en su formación hace que la búsqueda de la forma resistente sea un proceso de racionalidad en el que el conocimiento del material y la adecuación entre forma y materia adquieren un papel fundamental.

En este contexto la referencia a la obra de Frei Otto era inevitable. Sus obras más conocidas, como el Pabellón de Alemania en la Exposición Universal de Montreal de 1967, y su colaboración en el Estadio Olímpico de Munich de 1972, eran los exponentes más difundidos de estructuras de redes de cables y membranas cuyo modo principal de trabajo a tracción planteaba importantes innovaciones que hacían posible cubrir mayores luces con menos peso.

El estudio de la escasa bibliografía disponible (principalmente la obra de Conrad ROLAND, una de las pocas monografías traducidas al castellano y publicada por Gustavo Gili en 1973, así como la obra editada por Frei OTTO y traducida al inglés con el título de *Tensile Structures*) ya hacía entrever la importancia de su aportación teórica, rica en sugerencias y posibilidades, al hacer mención de la metodología experimental, de la reflexión sobre la relación entre forma y estructura y sobre las estructuras naturales, de las exploraciones gráficas de combinaciones y relaciones en distintos tipos estructurales, entre otras cuestiones.

Puesto en contacto directamente con el citado Instituto de Stuttgart, y a través de uno de sus más antiguos colaboradores, el ingeniero Jürgen Hennicke, pude tener acceso a algunas publicaciones del Instituto ya agotadas, y a otras más recientes, pero en ambos casos sin apenas difusión en nuestro

ámbito más próximo. El contraste que planteaba toda la rica y vasta experiencia de Frei Otto y su Instituto, reflejada en estas publicaciones, con la visión de Frei Otto que ofrecía la historiografía de la arquitectura moderna era cada vez más acusado.

Un breve recorrido por algunas obras significativas de esta historiografía nos dibujará los principales trazos sobre el estado de la cuestión en lo que se refiere a la consideración de Frei Otto y su aportación a la arquitectura de la segunda mitad del siglo XX.

La "Historia de la arquitectura moderna" de Leonardo Benevolo hace dos breves menciones a Frei Otto. Una para señalar su figura como una de las más sobresalientes en Alemania indicando que "a partir de 1954 estudia un tema constante, el de las cubiertas tensadas, realizadas para la Exposición de Lausanne de 1964, para el Pabellón Alemán en Montreal de 1967 y, en amplia escala, para las instalaciones olímpicas de 1972 en Munich"¹. La otra mención aparece en los siguientes términos: (...) "en *The Architectural Review*, P. Buchanan propone el término *high tech*, para designar una corriente específica de la arquitectura inglesa, emparentada en el extranjero con Piano y con los arquitectos más ancianos R. B. Fuller, J. Prouvé, F. Otto."²

La "Historia crítica de la arquitectura moderna" de Kenneth Frampton menciona a Frei Otto en un apartado bajo el epígrafe de "Productivismo"³ en el que se toma el concepto de *Produktform* definido por Max Bill para caracterizar arquitecturas con un

¹ BENEVOLO, Leonardo: *Historia de la arquitectura moderna*. Gustavo Gili. Barcelona, 1994 (1992). Pág. 1019.

² Op. cit. pág. 1060.

³ FRAMPTON, Kenneth: *Historia crítica de la arquitectura moderna*. Gustavo Gili. Barcelona, 1996 (1992). Pág. 306.

gran énfasis en la elegancia de la propia producción, entre las cuales figuran como paradigma, en el mismo apartado, varias obras de Norman Foster. El mismo autor, en su obra "Estudios sobre cultura tectónica", tras una referencia a las contribuciones seminales de algunos de los ingenieros más importantes del siglo XX, hace una breve mención a Frei Otto para situarlo, junto a Robert Le Ricolais y Vladimir Suchov, como "figuras únicas que han trabajado principalmente en el ámbito de las redes de estructuras en suspensión"⁴.

Por último, tomando ya como referencia una obra de nuestro entorno más próximo como la titulada "Después del movimiento moderno. Arquitectura de la segunda mitad del siglo XX", de Josep Maria Montaner, la obra de Frei Otto queda encuadrada dentro de la denominada "arquitectura neoproduccionista"⁵, en un período de "optimismo tecnológico", cuyo paradigma más emblemático vuelve a ser la obra de Norman Foster.

Así pues, el estado de la cuestión que nos muestra este breve recorrido nos presenta la aportación de Frei Otto centrada principalmente en dos obras: el Pabellón de Alemania en la Exposición Universal de Montreal de 1967, y el Estadio Olímpico de Munich de 1972, y enmarcada en el *high tech*, junto a figuras tan emblemáticas como Norman Foster.

⁴ FRAMPTON, Kenneth: *Estudios sobre cultura tectónica*. Akal. Madrid, 1999 (1995). Pág. 320.

⁵ MONTANER, Josep Maria: *Después de la arquitectura moderna*. Gustavo Gili. Barcelona, 1999. Pág. 120.

1.2. Objetivos, metodología y fuentes.

La primera hipótesis de partida, y por lo tanto su demostración como uno de los objetivos de esta tesis, ha sido, pues, la necesidad de desvincular a Frei Otto del *high tech*, y de considerar su obra y su reflexión teórica dentro del tronco común de la tradición de los ingenieros en su búsqueda de la forma resistente, en su reflexión sobre la relación entre estructura y forma, para poder entender con profundidad el sentido de la obra de Frei Otto y su Instituto, y su aportación a la arquitectura desde su experiencia de metodología, investigación y sistematización.

Como consecuencia de lo anterior, otro objetivo de esta tesis ha sido el análisis de las categorías y los conceptos utilizados en su afán por establecer una clasificación, una sistematización o estructura interpretativa coherente de las formas y las estructuras, desde un planteamiento globalizador, que incluye no sólo los objetos creados por el hombre, sino también los objetos de la naturaleza, tanto animada como inanimada, buscando principios comunes. A este respecto es significativa la cita del libro de D'Arcy W. Thompson "Sobre el crecimiento y la forma" que abre la publicación editada por Frei Otto titulada "*Natürliche Konstruktionen*" (Estructuras naturales): "La búsqueda de diferencias o contrastes fundamentales entre los fenómenos orgánicos e inorgánicos, entre los seres animados o inanimados, ha ocupado la mente de muchos hombres, mientras que la búsqueda de una unidad de principios o de similitudes esenciales ha sido emprendida por muy pocos"⁶.

⁶ THOMPSON, D'Arcy W.: *Sobre el crecimiento y la forma*. H. Blume. Madrid, 1980 (1917). pág. 6.

Otro objetivo de esta tesis ha sido el análisis de las exploraciones gráficas de combinaciones y relaciones que plantea Frei Otto en sus catálogos de diferentes tipos estructurales, y su papel como puente entre el conocimiento y la creación, como estímulo para la creatividad.

Sintetizando en un objetivo más genérico un propósito básico de esta tesis ha sido plantear la plena vigencia y actualidad tanto del enfoque interdisciplinar para la investigación en la arquitectura que salve la división artificial entre las artes y las ciencias, como de la experiencia metodológica de Frei Otto y su Instituto, avalada por otras instituciones internacionales, como la *International Association for Shell and Space Structures* o el *Space Structures Research Centre* de la Universidad de Surrey, donde frente a la retórica contemporánea del *high tech*, de la búsqueda deliberada del alarde, del efecto, de la espectacularidad como primer objetivo, se plantea la búsqueda de la adecuación entre el material y la forma resistente con unos valores de autenticidad y sinceridad, ética y responsabilidad social.

La metodología empleada en la elaboración de esta tesis ha venido condicionada en gran medida por la estrategia de publicaciones llevada a cabo por el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart bajo la dirección de Frei Otto. Uno de los aspectos que sobresalen de este Instituto es precisamente la voluntad constante y decidida de dejar constancia escrita de todos los trabajos y las investigaciones llevadas a cabo desde su fundación. Tesis, trabajos de investigación de alumnos, experimentos con maquetas, coloquios, simposios y otras activida-

des han quedado reflejadas en las publicaciones del Instituto de manera sistematizada a través de las líneas o temas de investigación mantenidos durante años en el marco de diferentes programas de investigación, entre los que destacan, por su entidad y duración, dos, auspiciados y financiados por el gobierno alemán: el programa SFB 64 *Weitgespannte Flächentragwerke* (Estructuras ligeras de grandes luces) y el programa SFB 230 *Natürliche Konstruktionen* (Estructuras naturales).

Estos dos grandes programas de investigación han hecho posible una buena parte de las publicaciones en las que el Instituto ha tomado parte. Entre ellas podríamos distinguir varias series. La serie denominada *IL Mitteilungen* (Informes IL) sería la que recoge las recopilaciones y síntesis finales de trabajos e investigaciones realizados a lo largo de determinados periodos sobre diferentes temas. Podríamos decir que es la serie básica que nos da una visión de conjunto de la actividad del Instituto. Por otro lado están las series que recogen los documentos internos de trabajo de los diferentes grupos o proyectos de cada programa de investigación. Así está la serie *SFB 64 Mitteilungen* (Informes del programa SFB 64) y la serie *SFB 230 Konzepte* (documentos del programa SFB 230). Por último conviene resaltar también las actas de los diferentes simposios organizados en el marco de estos dos grandes programas de investigación.

Toda esta bibliografía ofrece un vasto panorama que, por el idioma y por su escasa difusión fuera de los círculos especializados, apenas ha tenido trascendencia en nuestro entorno profesional o académico más próximo. Ha sido por tanto

necesario, mediante el contacto directo con el Instituto, conseguir acceso a estas publicaciones, bastantes de ellas ya agotadas y otras de difícil adquisición fuera de los circuitos habituales para el suministro de la bibliografía extranjera. La selección de textos, su traducción y sintetización, así como la ordenación de los temas en ellos abordados, ha sido una labor importante que ha condicionado la metodología empleada en la elaboración de esta tesis para poder hacer accesible toda esta importante reflexión teórica y permitir así una reconsideración de la aportación a la arquitectura de Frei Otto y su Instituto.

II. La tradición de los ingenieros en la búsqueda de la forma resistente con nuevos materiales a lo largo del siglo XX.

II.1. El desarrollo de nuevos materiales a partir de la Revolución Industrial y la nueva profesión de ingeniero civil.

Desde los inicios de la Revolución Industrial, en la segunda mitad del siglo XVIII, se ha producido un importante desarrollo de nuevos materiales que se han ido incorporando a la construcción a medida que la industria los hacía asequibles por sus volúmenes de producción, su calidad y su coste. El hierro, en sus diferentes naturalezas: fundido, forjado, pudelado, y el acero han experimentado un desarrollo importante que se manifiesta en su presencia en muchos diseños de obras públicas a lo largo del siglo XIX, de la mano de los ingenieros, en su mayor parte. Este desarrollo se va a prolongar a lo largo del siglo XX con la incorporación a la construcción de otros nuevos materiales: el hormigón, el hormigón armado, el acero de alta resistencia a tracción, el hormigón pretensado.

Por otro lado se ha producido una escisión de las dos profesiones de arquitectos e ingenieros desde mediados del siglo XVIII, que ha tenido su reflejo tanto en las instituciones profesionales – Académie d'Architecture / Corps de Génie Civil – como en las docentes – École de Beaux-Arts / École des Ponts et Chaussées / École Polytechnique – y que plantea la existencia de dos actitudes hacia el diseño de la obra pública.

Efectivamente, en el modelo de la École Polytechnique el papel de la ciencia en la formación de los ingenieros va a asumir una importancia crucial,

aunque también el desfase entre el grado de desarrollo del cálculo de estructuras y la disponibilidad de los nuevos materiales, hará evidente la distinta manera de acometer el diseño de las obras de ingeniería que se va a plantear en Francia y en Inglaterra: en el primer caso basado en el cálculo científico, en el segundo caso basado en la experimentación.

Sin embargo hay algo que va a caracterizar la filosofía del diseño de los ingenieros con los nuevos materiales del siglo XX, y que tiene una fuerte implicación con la forma. Esto lo expresa con claridad Javier Manterola en un artículo publicado en 1997⁷: *“los buenos diseños no son el resultado de una interpretación formal del hecho resistente, sino que deben ser el descubrimiento de su esencia. En el fondo lo resistente tiene la exigencia de ser desvelado formalmente. No es algo interpretable, es algo por descubrir, que está ahí y que debemos tener el talento de traducir en formas”*. La forma no se concibe, pues, como un *a priori*, sino como una consecuencia.

⁷ MANTEROLA, J.: *“Arquitectos-ingenieros. El futuro de los puentes”*, en *Revista de Obras Públicas*. Nº 3.366. Junio de 1997. Pág. 20.

II.2. La integración entre estructura y forma y la sensibilidad estética del siglo XX.

Esta cuestión de la relación entre forma y material no es una preocupación exclusiva de los ingenieros. La podemos encontrar también en algunos exponentes de las vanguardias artísticas del siglo XX. Por ejemplo en la Bauhaus, en el curso preliminar de Josef Albers. Objetivo de la pedagogía de la forma en el citado curso es la investigación de la relación entre forma y material, planteado desde la experimentación, en este caso con materiales de taller.

Fig.1. Examen de los trabajos del curso preliminar de Albers en la Bauhaus. Fuente: Fiedler, J.; Feierabend, P.: *Bauhaus*. pág. 374.

1



Albers, según relata uno de sus alumnos, Hannes Beckmann, *“entraba en la sala con un montón de periódicos bajo el brazo que mandaba repartir entre los estudiantes... ‘Señoras y señores, somos pobres, no ricos. No podemos permitirnos malgastar material ni tiempo. Debemos convertir lo peor en lo mejor. Cada obra de arte cuenta con un determinado material de partida y, por tanto, primero debemos investigar cómo está hecho este material. Para ello, primero deberemos experimentar, sin confeccionar nada. En estos momentos preferimos la habilidad a la belleza. [...] Piensen que en general conseguirán más cuanto menos hagan. Nuestro estudio debe fomentar el pensamiento constructivo. [...] Ahora quiero que tomen los periódicos que les he dado y los conviertan en algo más de lo que son ahora. También quiero que respeten el material, que lo configuren de forma razonable y que tomen en consideración sus propiedades”*⁸. El curso de Albers tenía como objeto, pues, el propio material, la experimentación y el reconocimiento de las cualidades de los materiales y de su modificabilidad.

Aparecen ya diferentes procesos de estructuración de la forma, como por ejemplo el *pliegue* o el *curvado*, como medios para dar rigidez a un material flexible como el papel de periódico o el cartón ondulado. Son principios que curiosamente encontraremos de nuevo más adelante al analizar algunas de las obras de los ingenieros más innovadores en la creación de formas con los nuevos materiales del siglo XX.

Los pioneros y los historiadores de la arquitectura moderna intuyen que en las obras de estos ingenieros se da una integración entre estructura y forma,

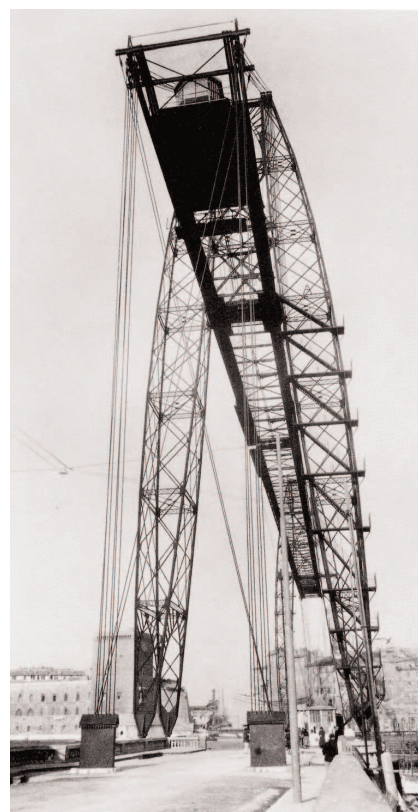
⁸ Véase FIEDLER, J.; FEIERABEND, P. (ed.): *Bauhaus*. Könemann. Madrid, 2000 (1999). Pág. 374-375.

una cierta cualidad de belleza abstracta que va a caracterizar el arte del siglo XX, hasta el punto de considerar ya las obras de ciertos ingenieros como obras de arte.

Así, en un temprano y no muy conocido artículo de Walter Gropius: *Die Entwicklung Moderner Industriebaukunst*, de 1913, su autor hace un encendido elogio de los constructores americanos que con sus fábricas, elevadores de grano y carboneras “han conservado fresco e intacto el sentimiento natural hacia las formas compactas”⁹. La figura del ingeniero es presentada como la del héroe-artista, como el buen salvaje roussoniano.

Le Corbusier, en su influyente escrito *Hacia una arquitectura*, publicado en 1923, también presenta las imágenes de fábricas y elevadores junto a las obras de algunos ingenieros, como el puente Garabit de Eiffel o los hangares de Orly, de Freyssinet, como el paradigma de la nueva arquitectura.

En el capítulo *Estética del ingeniero. Arquitectura* Le Corbusier hace referencia a los ingenieros – nuevamente los buenos salvajes – y afirma: “sin seguir una idea arquitectónica, sino simplemente guiados por los efectos del cálculo (derivados de los principios que rigen nuestro universo) y por la concepción de un ORGANISMO VIABLE, los INGENIEROS de hoy emplean elementos primarios y los coordinan según las reglas, provocando en nosotros emociones arquitectónicas, haciendo de este modo que resuene la obra humana al compás del orden universal.



2

Fig. 2. Puente transbordador de Marsella. Fuente: Giedion, op. cit. pág. 146.

⁹ GROPIUS, W.: “Die Entwicklung moderner Industriebaukunst”, en Jahrbuch des Deutschen Werkbundes (1913). Recogido en BANHAM, R.: *La atlántida de hormigón*. Nerea. Madrid, 1989 (1986). Pág. 190.

*He aquí los silos y las fábricas norteamericanas, magníficas PRIMICIAS del tiempo nuevo. LOS INGENIEROS NORTEAMERICANOS APLASTAN CON SUS CÁLCULOS LA ARQUITECTURA AGONIZANTE*¹⁰.

Otras referencias a las obras de los ingenieros aparecen en otros escritos de esa misma década, como los de Adolf Behne y Ludwig Hilberseimer¹¹. Uno de esos escritos es la temprana obra de Sigfried

3



¹⁰ LE CORBUSIER: *Hacia una arquitectura*. Poseidón. Barcelona, 1977 (1923). Pág. 20.

¹¹ Véase: BEHNE, A.: *La construcción funcional moderna*. Ed. del Serbal. Barcelona, 1994 (1926), y también HILBERSEIMER, L.: *La arquitectura de la gran ciudad*. Gustavo Gili. Barcelona, 1979 (1927).

Giedion, publicada en 1928, titulada *Bauen in Frankreich. Bauen in Eisen. Bauen in Eisenbeton*¹², (La construcción en Francia. La construcción en hierro. La construcción en hormigón armado).

En su portada, diseñada por László Moholy-Nagy, aparece formando parte de la composición una imagen en negativo de una de las obras de la ingeniería del hierro de principios del siglo XX: el puente transbordador del puerto de Marsella.

En este texto Giedion realiza un análisis de los exponentes de la “nueva arquitectura de vanguardia” centrando la atención en la arquitectura de hierro y de hormigón de los siglos XIX y XX en Francia. El

Fig. 3. Portada de la obra de Sigfried GIEDION: *Bauen in Frankreich. Bauen in Eisen. Bauen in Eisenbeton*. Fuente: Giedion, S.: *Building in France. Building in Iron. Building in ferro-concrete*. pág. 81.

Fig. 4. Hangar de Orly en construcción, 1916. Fuente: Giedion, op. cit. pág. 152.



4

¹² GIEDION, Sigfried: *Bauen in Frankreich. Bauen in Eisen. Bauen in Eisenbeton*. Klinkhardt & Biermann. Leipzig, 1928. Existe traducción al inglés: *Building in France. Building in Iron. Building in Ferroconcrete*. The Getty Center for the History of Art and the Humanities. Santa Mónica, 1995.

Fig. 5. Puente de St. Pierre de Vauvray, 1922. Fuente: Giedion, op. cit. pág. 200.

Fig. 6. Esquemas de estática gráfica. Fuente: A.A.V.V.: *L'art de l'ingénieur*. pág. 469.

Último capítulo del libro, titulado "El estado actual del hormigón armado", se abre con tres obras de Freyssinet.

Finalmente, en *Espacio, tiempo y arquitectura*, también de Giedion, cuya primera edición es de 1941, destaca la amplia atención dedicada a las obras de Robert Maillart en el capítulo dedicado a la construcción laminar, ejemplificada con varios puentes, mientras que en las últimas ediciones sólo se menciona una obra de Freyssinet, el depósito de locomotoras en Bagnaux, de 1929, y ninguna obra de Torroja. Sólo aquí se analiza un poco más en detalle el sistema laminar empleado por Maillart en el diseño de los puentes presentados.

5

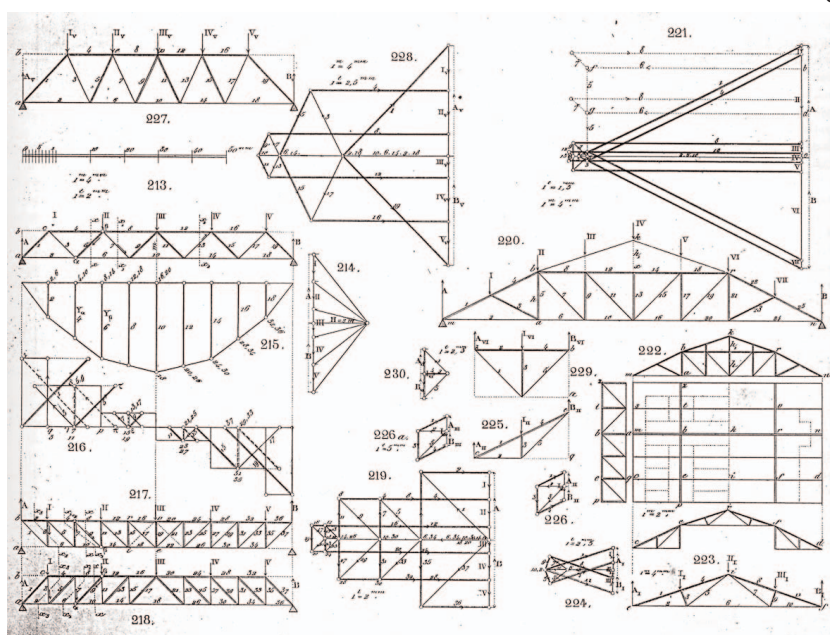


II.3. Algunos ejemplos de esta tradición.

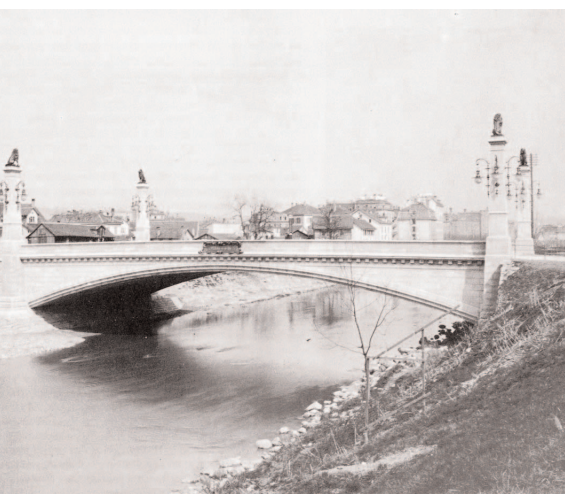
II.3.1. Robert Maillart (1872-1940).

La aportación de la obra del ingeniero suizo Robert Maillart en los inicios de la utilización del hormigón armado a principios del siglo XX es decisiva para entender el proceso de búsqueda de la forma resistente con este nuevo material.

Para ello conviene señalar en primer lugar la influencia que en su actitud hacia el diseño tuvieron los dos primeros directores del Departamento de Ingeniería Civil del Politécnico de Zurich, donde él estudió: Carl Culmann y Wilhelm Ritter, autor, el primero, y reelaborador, el segundo, de un tratado titulado *Estática gráfica*¹³, cuya idea básica era mostrar el comportamiento estructural mediante esquemas

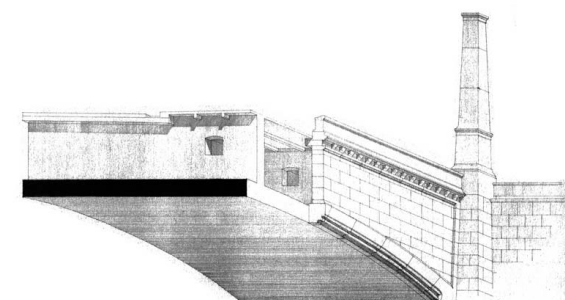


¹³ CULMANN, C.: *Die graphische Statik*. Von Meyer und Zellers. Zurich, 1866.



7

8



geométricos, más que con fórmulas algebraicas. Esta obra representa una actitud hacia el diseño que es la síntesis de los dos enfoques que predominan en los inicios del hormigón armado: el enfoque alemán, basado en el cálculo científico, y el enfoque francés basado en la experiencia propia y en una tradición visual para el análisis estructural iniciada en el siglo XVIII por el matemático francés Gaspard Monge.

Todos estos antecedentes en la formación de Maillart van a ir configurando una cultura visual, una percepción física, gráfica y formal del fenómeno resistente, una sensibilidad estética y estática, que va a ser decisiva en la evolución que experimentará el diseño de sus obras en ese proceso de búsqueda de la forma resistente con el hormigón armado, todavía incipiente como material de construcción.

En uno de sus primeros diseños, el puente Stauffacher, en la ciudad de Zurich, de 1899, la apariencia todavía es la de una obra de fábrica de sillar, en consonancia con el carácter urbano y representativo que para las autoridades municipales tiene este material tradicional.

Sin embargo en su diseño está presente el hormigón, tanto en la bóveda como en la losa de la calzada, aunque intencionadamente ocultado por los muros longitudinales de fábrica de sillar que forman los tímpanos del puente. El hormigón todavía se concibe como una piedra artificial, y por lo tanto todavía se asocia a las grandes masas encargadas de soportar las cargas de los elementos situados sobre ellas. Vemos aquí el esquema tradicional de cargas descendentes desde unos elementos inertes, soportados, en la parte superior hasta otros elementos sustentan-

Fig. 7. Puente Stauffacher. Vista de conjunto. Fuente: Billington, D.P.: *Robert Maillart's bridges. The art of engineering.* pág. 17.
Fig. 8. Idem. Esquema constructivo. Fuente: Billington, D.P.: *op. cit.* pág. 22.

tes, la bóveda de hormigón en masa de gran espesor que recoge todas las cargas en la parte inferior. Los muros longitudinales de fábrica de sillar no tienen más misión que ocultar esa nueva piedra artificial, el hormigón, todavía indigno de mostrar su presencia en un entorno urbano. Son pues un añadido, una carga inerte adicional, con la única finalidad de darle al puente el aspecto exterior requerido.

En su siguiente obra, el puente de Zuoz, de 1901, en un entorno rural, Maillart define el diseño a partir de la sugerencia visual de la forma que la experiencia anterior le plantea. En efecto, con el trasfondo de esta cultura de la forma que como decíamos antes ha estado presente en su formación, por un lado, y la disciplina de la búsqueda de la mayor adecuación del material a la función resistente, por otro, Maillart sustituyó en este puente esas fachadas laterales de fábrica de sillar por muros longitudinales de hormigón, integrando de esta manera lo que anteriormente había sido un añadido, al conjunto de la estructura de la obra. Forma y estructura se integran así de manera que todos los elementos del conjunto trabajan solidariamente en la transmisión de cargas al formar la calzada, los muros longitudinales y la bóveda una estructura en cajón, alveolar, una bóveda hueca. El esquema de la transmisión de cargas ya no es descendente, ni se caracteriza por la distinción de unos elementos sustentantes y otros sostenidos, sino que se forma un sistema en el que todos los elementos, desde los ubicados en la parte superior hasta los situados en la parte inferior contribuyen activamente en la transmisión de todas las cargas. Al no tener que recoger un único elemento del sistema todas las cargas, se hace posible la reducción de



9

10

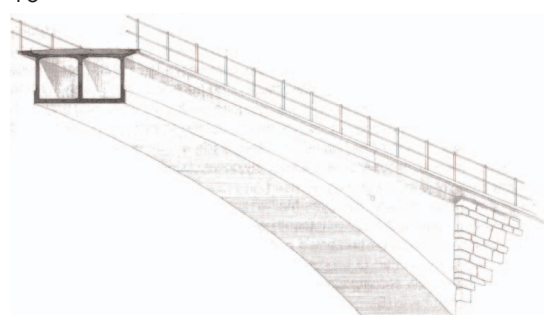


Fig. 9. Puente de Zuoz. Vista de conjunto. Fuente: Billington, D.P.: *Robert Maillart and the art of reinforced concrete*. pág. 6.
Fig.10. Idem. Esquema constructivo. Fuente: Billington, D.P.: *Robert Maillart's bridges. The art of engineering*. pág. 23.



12



11



13

las masas. Los elementos del sistema, todos ellos de hormigón, como en la obra anterior, ven reducidos sus espesores pasando a ser láminas, elementos superficiales. El material ha pasado así de ser considerado una piedra artificial, y por lo tanto vinculado a las grandes masas, a formar un sistema de elementos laminares. Se ha pasado así a la creación de sistemas que soportan cargas más por la forma que por la masa.

Este salto cualitativo trae como consecuencia un nuevo énfasis en el potencial visualmente expresivo de los pequeños espesores, de la ligereza. Nuevas formas no asociables a ninguno de los materiales tradicionales, que sugieren unas geometrías mucho más abstractas, más elementales, casi inmateriales, que son percibidas como formas del arte del siglo XX.

Véase como ejemplo el puente Schwandbach, de 1933, en el que el diseño de Maillart ha evolucionado hasta el punto de hacer bien evidentes los delgados espesores del sistema de láminas que forman el conjunto de la obra. Es bien significativa a este respecto la imagen histórica que reproduce la figura 12, tomada de la monografía que Max Bill publicó sobre la obra de Maillart en 1949, dos años después de su primera exposición monográfica en el Museo de Arte Moderno de Nueva York.

Fig. 11. Puente Salginatobel. Fuente: Billington, D.P.: *Robert Maillart and the art of reinforced concrete*. pág. 48.

Fig. 12. Puente Schwandbach. Perfil lateral. Fuente: Bill, Max: *R. Maillart*, pág. 89.

Fig. 13. Puente Schwandbach. Perspectiva del lado convexo. Fuente: Billington, D.P.: *Robert Maillart's bridges. The art of engineering*. pág. 97.

Fig. 14. Puente Schwandbach. Perspectiva del lado cóncavo. Fuente: Billington, D.P.: *Robert Maillart and the art of reinforced concrete*. pág. 69.

Fig. 15. Puente Schwandbach. Perspectiva del lado convexo. Fuente: Billington, D.P.: *Robert Maillart and the art of reinforced concrete*. pág. 67.

Fig. 16. Sistema Hennebique para estructuras de edificación. Fuente: Billington, D. P.: *Robert Maillart and the art of reinforced concrete*. pág. 15.

Una obra cuyo valor estético se ve realzado por la aparente simplicidad con que se adapta el sistema de láminas a la complejidad que representa para el diseño de la obra la directriz curva de la calzada. Dos superficies curvas, una horizontal – la calzada –, la otra vertical – la bóveda –, que se encuentran en un punto de tangencia en el centro del puente.

La bóveda con un borde curvo siguiendo la concavidad de la calzada, y el otro borde contenido en un plano vertical, alejado de la convexidad de la calzada, para evitar la torsión.

Entre ambas superficies la serie de láminas verticales paralelas cuyo perfil se va adaptando en cada punto a la calzada y a la bóveda. Un magnífico ejercicio de integración entre estructura y forma, donde el material se lleva al límite de sus posibilidades, y cuyo valor estético no reside en ningún elemento específicamente diseñado para ello, sino en esa síntesis integradora de todos los elementos para producir una solución de una gran sencillez aparente a un problema de una gran complejidad real.

Este salto cualitativo de las masas inertes a las masas activas en la obra de Maillart no se produce únicamente en los puentes. Tal como señala Giedion, las losas con pilares fungiformes constituyen otro ejemplo de ello.

El sistema Hennebique de 1898, para estructuras reticulares de edificación en hormigón armado nos remite a las formas ya tradicionales de otros materiales más antiguos: el esquema de losa soportada por vigas, y éstas, a su vez, por pilares, es un sistema de elementos lineales de soporte, típico de

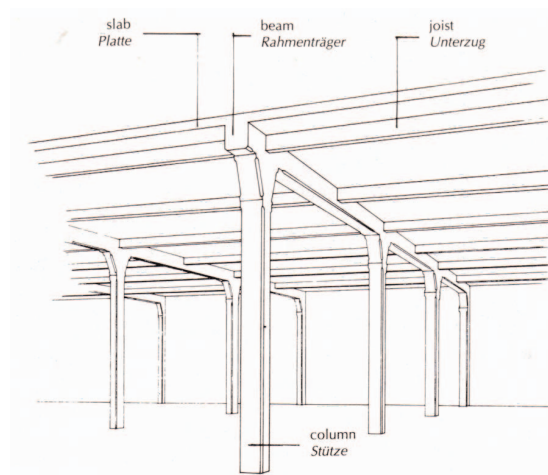


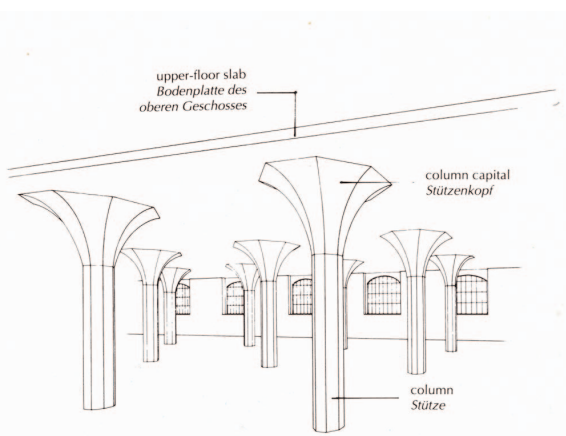
14



15

16





17

las estructuras de madera, en el que encontramos de nuevo unos elementos inertes – las losas –, que son soportados por otros elementos activos – las vigas y los pilares.

Maillart transforma las losas en elementos estructurales activos armándolas adecuadamente, de manera que se hace posible prescindir de vigas para soportar techos. El primer ejemplo lo encontramos en un almacén en Zurich, en 1910.

Un nuevo salto cualitativo que va a afectar a la forma resistente de los edificios, y que encontrará su repercusión en obras pioneras de la arquitectura moderna, como la sede del *Turun Sanomat*, en Turku, proyectada por Alvar Aalto, realizada entre 1928 y 1930, o las fábricas *Van Nelle*, en Rotterdam, de Brinkman y Van der Vlugt, de 1929, y *Boots*, en Nottingham, de Owen Williams, de 1932.

18



Fig. 17. Esquema de losas fungi-formes. Fuente: Billington, D. P.: *Robert Maillart and the art of reinforced concrete*. pág. 15.

Fig. 18. Almacén en Zurich. Fuente: Billington, D. P.: *Robert Maillart and the art of reinforced concrete*. pág. 14.

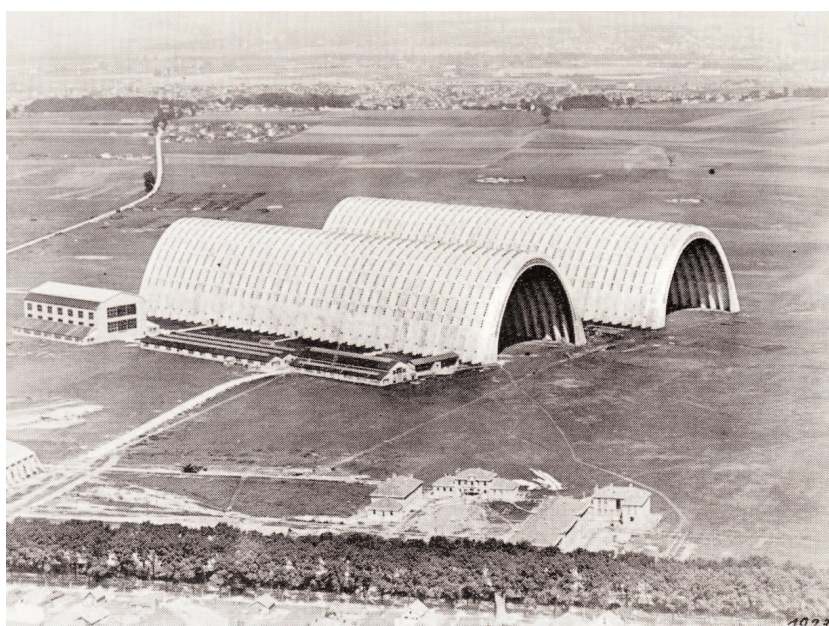
Fig. 19. Vista aérea de los hangares de Orly. Fuente: Fernández Ordóñez, J.A.: *Eugène Freyssinet*. Fig. 61, pág. 103.

II.3.2. Eugène Freyssinet (1879-1962).

Tal como se indicaba anteriormente, la obra de Eugène Freyssinet aparece reflejada desde las más tempranas publicaciones de los pioneros y los historiadores de la arquitectura moderna como paradigma de ésta.

Figura clave en la ingeniería del siglo XX – baste recordar su aportación en el desarrollo de uno de los nuevos materiales del siglo XX – el hormigón pretensado – con una patente presentada ya en 1928, de entre los antecedentes en su formación de una cultura de la forma construida, será fundamental, tal como él mismo relata en uno de sus escritos, su experiencia de artesano en su tierra natal, que le va a proporcionar una intuición controlada por la experiencia, hasta el punto de relativizar el papel del cálculo, cuando aquélla – la experiencia – se hallaba en contradicción con el resultado de éste.

19



En su trayectoria será fundamental el conocimiento del material por la experimentación y la observación atenta del comportamiento de la propia obra construida.

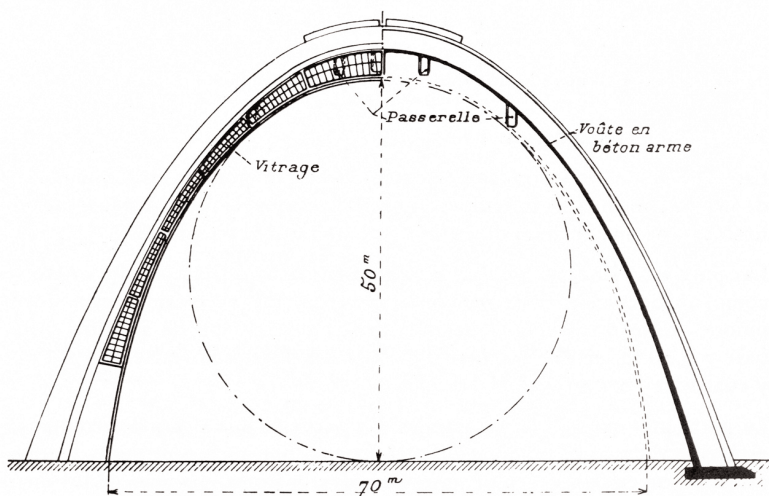
Los dos hangares gemelos para dirigibles construidos en Orly entre 1921 y 1923, cuyas imágenes aparecen en muchas de las publicaciones pioneras de la arquitectura moderna a las que nos referíamos anteriormente, constituyen otro ejemplo paradigmático de resolución mediante un material y un sistema formal de una sencillez aparentemente extrema a un problema de una complejidad sin precedentes.

En efecto, se trataba de cubrir un espacio con unos requerimientos de gálibo y luz libre inusitados – 50 metros – que hacían inaplicables los esquemas estructurales tradicionalmente empleados. Hay dos tipos de esfuerzos principales que debe resistir la obra: los resultantes de su peso y los debidos al viento. Los del peso propio se minimizan adoptando una sección transversal en arco parabólico, mientras que para el viento se necesita una forma rigidizadora con una gran inercia que se debe conseguir con un mínimo de materia. Se adopta un sistema basado en láminas delgadas de hormigón armado, que si ha de seguir la forma de una bóveda de cañón de perfil parabólico con las dimensiones requeridas, tendrá una gran esbeltez, y por lo tanto la forma también tendrá que rigidizar esta superficie de una sola curvatura para evitar el pandeo.

El *pliegue* es la forma rigidizadora, el principio estructurador de la forma de la lámina en respuesta a las exigencias físicas externas, uno de los principios estructuradores de la forma de las láminas de papel que veíamos en el curso preliminar de Albers en la Bauhaus.

En este caso se trata de hormigón armado, un material que ha de ser moldeado vertiéndolo en unos encofrados que deben poder ser retirados sin grandes dificultades, una vez endurecido el hormigón, aspecto que tendrá también su influencia en la forma del perfil de los pliegues de la bóveda.

De nuevo nos encontramos en esta obra con un magnífico ejercicio de integración entre estructura y forma, de resistencia por la forma más que por la masa. Cubrición, espacio y estructura forman una síntesis integradora para producir – de nuevo – una solución de una gran sencillez aparente a un problema de una gran complejidad real.



20

21

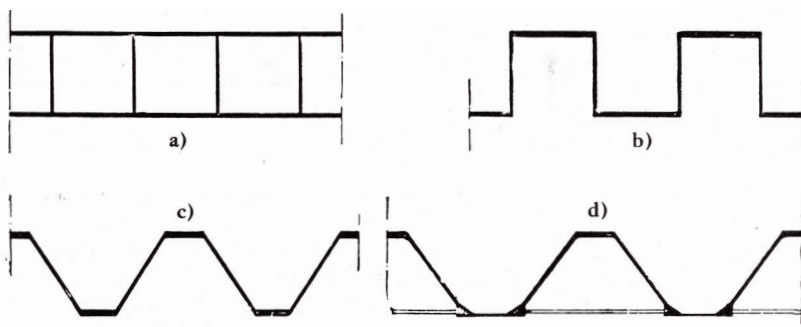
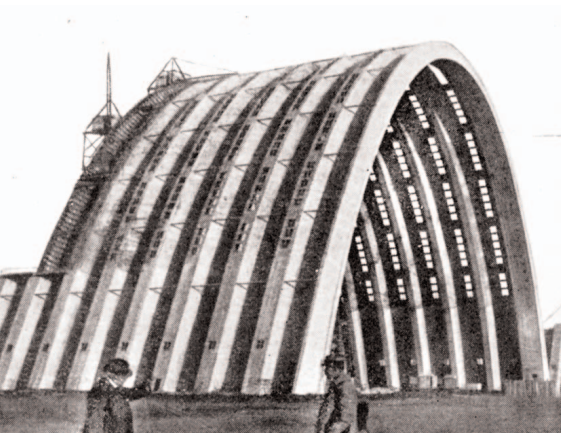


Fig. 20. Hangares de Orly. Perfil transversal. Fuente: Fernández Ordóñez, J.A.: op. cit. fig. 227, pág. 307.

Fig. 21. Hangares de Orly. Perfil de pliegues para la bóveda. Fuente: Fernández Ordóñez, J.A.: op. cit. fig. 229, pág. 309.



22

Se trata, pues, de una obra de ingeniería donde la gran escala impone a la materia una disciplina que la lleva al límite de sus posibilidades y obliga al diseñador a prestar una cuidada atención al fenómeno físico. La forma que vaya a adoptar el material tiene aquí una vinculación directa con el fenómeno físico. Pero no está totalmente determinada por él. Hay margen para la creatividad del diseñador. Freyssinet refleja en este diseño aquellos antecedentes en su formación de una cultura de la forma construida: sus paisanos, aquellos "artesanos universales", como él los denominaba, que habían creado para sí mismos "una civilización caracterizada por una preocupación extrema por la simplificación de las formas y por la economía de medios"¹⁴.

23

Fig. 230. Sección del elemento de clave. Hangares de Orly.

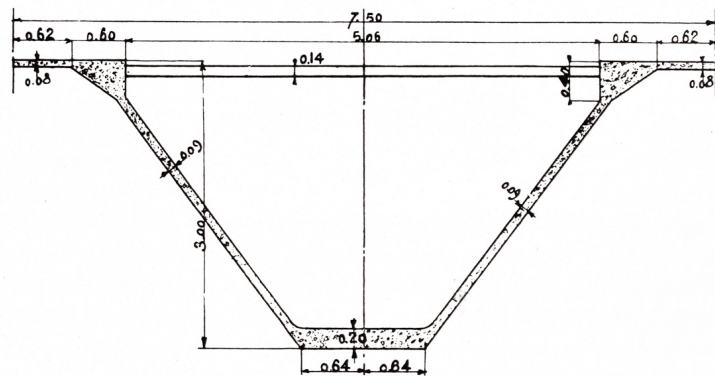


Fig. 231. Molde de un elemento extremo. Hangares de Orly.

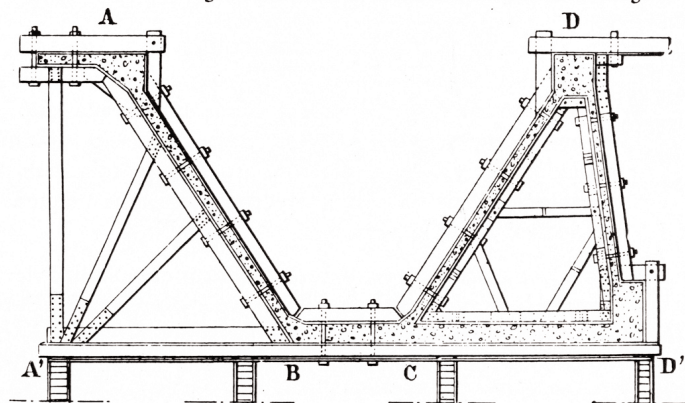


Fig. 22. Perspectiva de los hangares en construcción. Fuente: Fernández Ordóñez, J.A.: op. cit. fig. 61bis; pág. 103.

Fig. 23. Perfil definitivo y sección transversal de una onda. Fuente: Fernández Ordóñez, J.A.: op. cit. fig. 230, 231; pág. 309.

Fig. 24. El padre de Torroja y algunas ilustraciones de sus obras. Fuente: A.A.V.V.: *La modernidad en la obra de Eduardo Torroja*, pág. 20.

¹⁴ FERNÁNDEZ ORDÓÑEZ, J.A.: *Eugène Freyssinet*. 2C Ediciones. Barcelona, 1978. Pág. 11.

II.3.3. Eduardo Torroja (1899-1961).

La obra de Eduardo Torroja, aun no siendo mencionada por Giedion en *Espacio, tiempo y arquitectura*, pese a haber sido ya construidos sus ejemplos más emblemáticos cuando se publica la primera edición en 1941, es sin embargo otra aportación decisiva en esta cuestión de la relación entre forma y material, en esa integración entre forma y estructura.

En su formación también podemos encontrar antecedentes que han contribuido a formar en él una educación visual, una cultura de la forma.

24

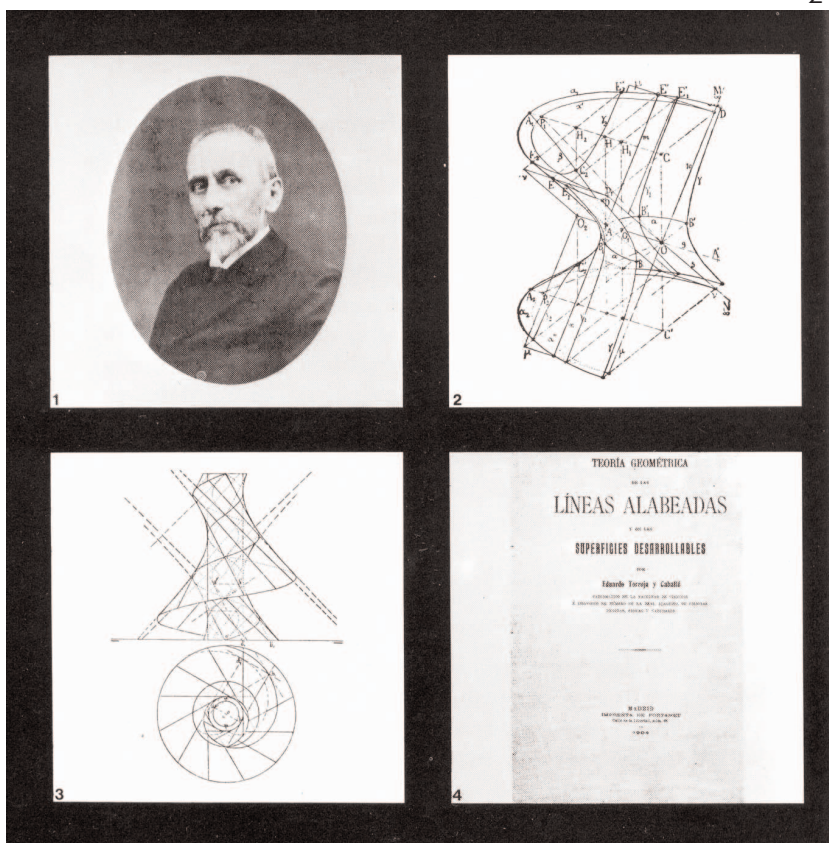


Fig. 25. Frontón Recoletos. Perspectiva interior. Fuente: *Informes de la Construcción* n.º137.

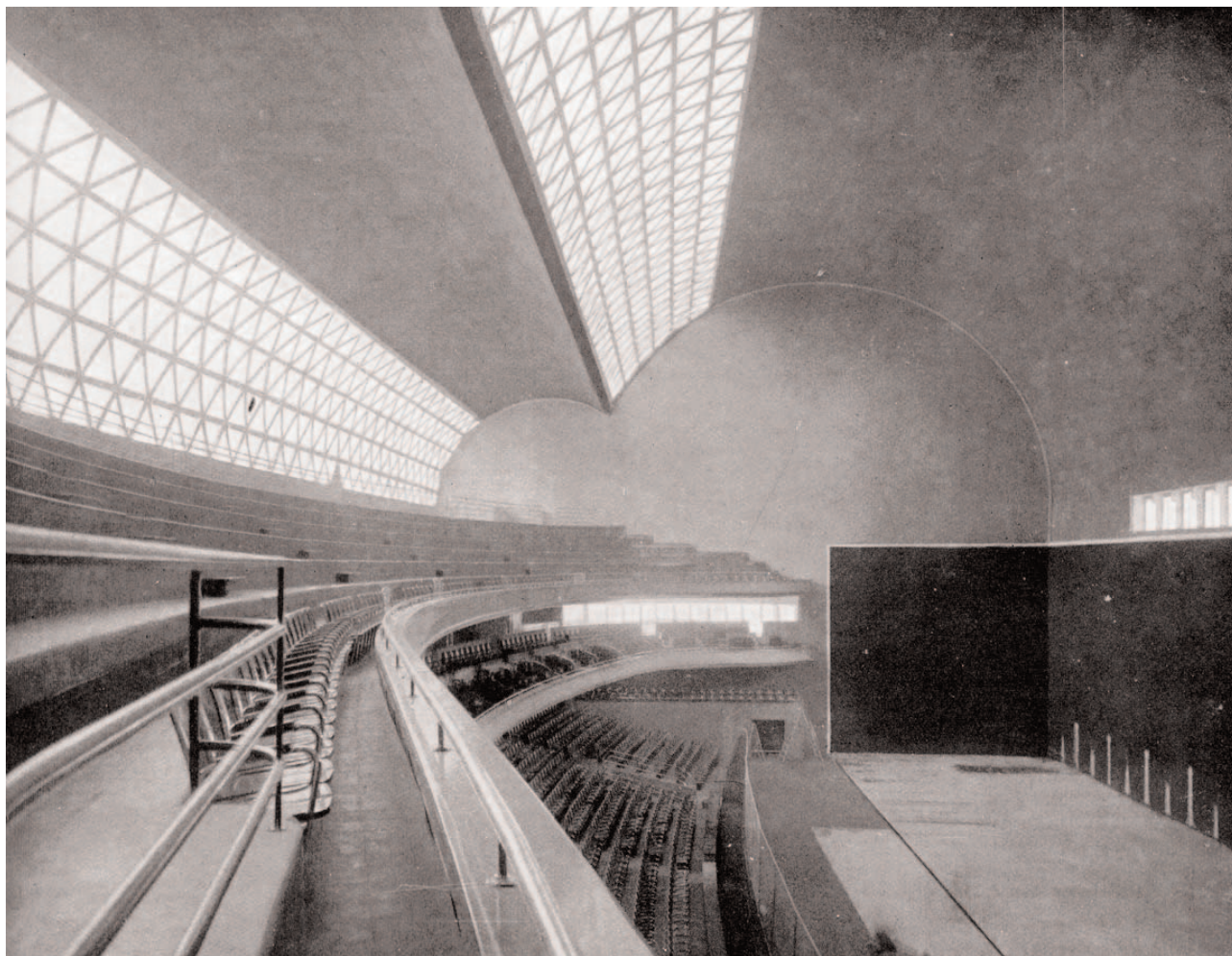
Fig. 26. Sección transversal del Frontón Recoletos. Fuente: *Informes de la Construcción* n.º137.

Su padre arquitecto, profesor de geometría, autor de un tratado sobre superficies regladas – la *Teoría geométrica de las líneas alabeadas y de las superficies desarrollables* – geometrías que podemos encontrar con frecuencia en muchas de sus obras.

Por otro lado el conocimiento de las bóvedas tabicadas, un precedente de las estructuras laminares, otro punto de partida para la formación de una sensibilidad por las superficies continuas, livianas y elegantes.

El frontón Recoletos en Madrid, de 1935, proyectado con el arquitecto Secundino Zuazo es sin duda un buen ejemplo de la aportación que representa su obra.

25



Se trata de un espacio cubierto por una delgada lámina de hormigón armado de tan solo 8 cm de espesor. Su forma de bóveda cilíndrica formada por dos lóbulos desiguales que generan una sección asimétrica, justificada por el requisito de cubrir e iluminar con sendos lucernarios orientados al norte las dos zonas desiguales de la cancha y las tribunas, llaman la atención por lo inusitado de su geometría y de sus dimensiones.

En efecto las bóvedas cilíndricas que estamos acostumbrados a ver – las bóvedas de cañón – se consideran como una serie de arcos iguales paralelos que transmiten las cargas desde la clave hasta las impostas por lo que necesitan apoyos continuos en sus bordes longitudinales, para no romper esta continuidad en la transmisión de cargas. ¿Cómo es pues posible que no exista apoyo, ni tan siquiera en forma de viga longitudinal, en uno de los bordes longitudinales de cada lóbulo cilíndrico? ¿De qué manera se

26

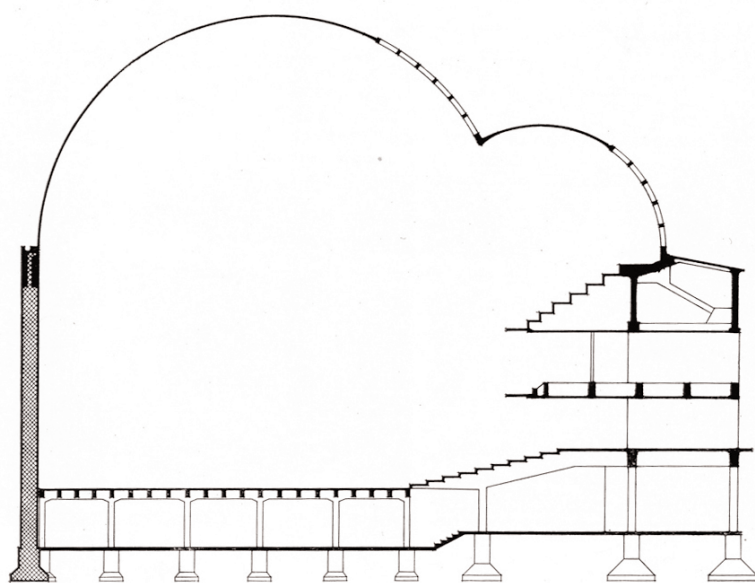


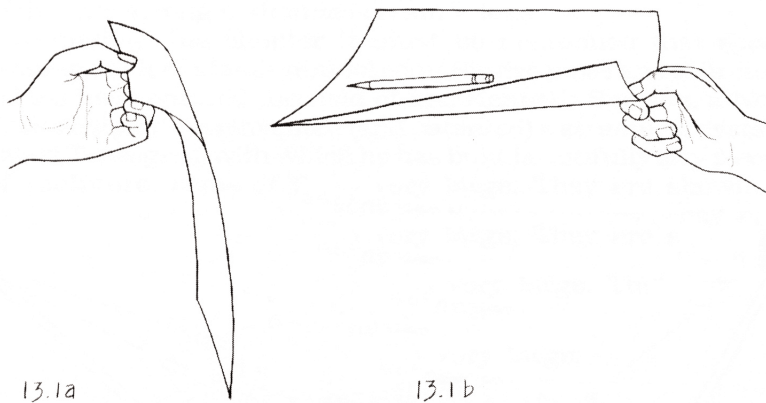
Fig. 27. Hoja de papel rigidizada por curvatura. Fuente: Salvadori, M.: *The Art of Construction*. Pág. 110.

establece la relación entre forma y material? El mismo Torroja nos lo explica en uno de sus escritos titulado *Las formas laminares*, al señalar que “las láminas cilíndricas son capaces de trabajar como una viga longitudinal en el sentido de las generatrices”¹⁵, es decir, que los apoyos que reciben las cargas no son los bordes longitudinales, sino los muros testeros. Toda una nueva visión de una forma tradicional – la bóveda de cañón – que se hace posible con un nuevo material – el hormigón armado – y con una nueva forma resistente: la viga longitudinal, que en lugar de la clásica forma prismática lineal, asociada a un material tradicional como la madera, adopta la forma de una delgada lámina curvada.

La *curvatura* es en esta ocasión el principio estructurador de la forma resistente, otro de los principios estructuradores de la forma de las láminas de papel que veíamos en el curso preliminar de Albers en la Bauhaus.

De nuevo nos encontramos en esta obra con un magnífico ejercicio de integración entre estructura y

27



¹⁵ TORROJA, E.: “*Las formas laminares*” (1957), en A.A.V.V.: *La modernidad en la obra de Eduardo Torroja*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 1979. Pág. 74.

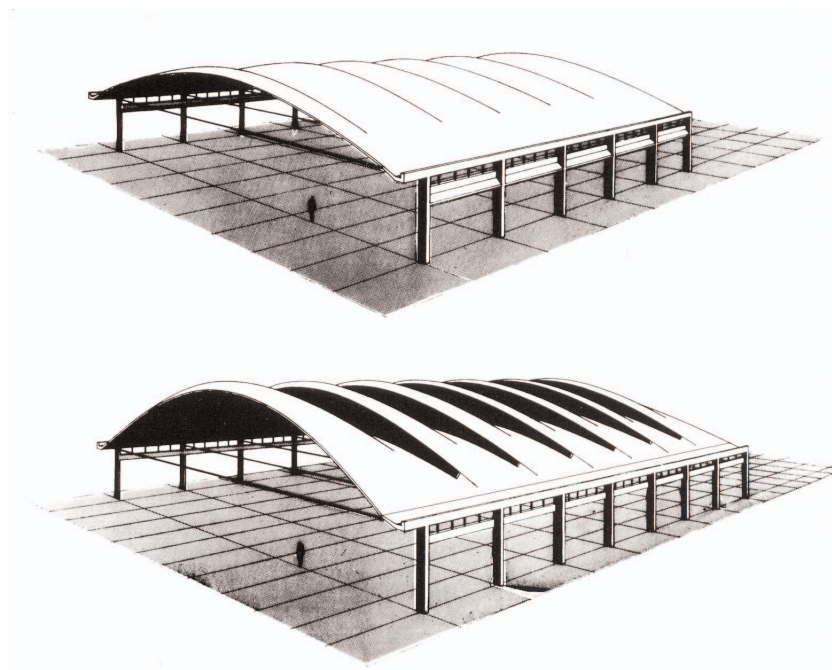
forma, de resistencia por la forma más que por la masa, de coincidencia del plano de composición técnica con el plano de composición estética. Cubierta, espacio y estructura coinciden en la forma, se funden en una síntesis integradora para producir mediante estas superficies continuas, sin nervios rigidizadores, ni arcos perpieños, ni tirantes, una continuidad espacial, una geometría abstracta, unas formas primarias que entroncan con la sensibilidad y las formas de las vanguardias del arte del siglo XX.

II.3.4. Eladio Dieste (1917-2000).

La obra de Eladio Dieste resulta particularmente interesante en esta búsqueda de la relación ajustada entre forma y materia, de la síntesis integradora de estructura, forma y calidad arquitectónica. Siendo un ingeniero más contemporáneo a nosotros, el entorno donde se produce su obra, principalmente Uruguay y los países limítrofes del cono Sur americano, nos sitúa en unas condiciones alejadas del nivel tecnológico de los países industrializados. Es en esas condiciones concretas donde se va a producir esa nueva síntesis entre forma y materia.

También podemos encontrar en su formación antecedentes que han contribuido a formar en él una sensibilidad estética, una cultura de la forma, entre ellos sus contactos frecuentes con artistas como Joaquín Torres García.

28



Un nuevo material – la cerámica armada – es concebido y desarrollado para producir nuevos sistemas formales basados en elementos laminares. Un material que hace uso del ladrillo, material tradicional enraizado en la cultura del país donde se produce la obra, haciéndolo estructuralmente activo al incorporarle la armadura y el mortero conveniente, y dándole nuevas posibilidades expresivas.

Una de las innovaciones formales más destacadas que produce este desarrollo de la cerámica armada como material estructural en la obra de Dieste son las bóvedas denominadas *gausas*, o de doble curvatura.

Se trata de una cubierta laminar de espesor el de un ladrillo revestido por el extradós, cuyas secciones transversales son curvas catenarias, con el fin de que su propio peso produzca compresión simple. El problema mayor para salvar grandes luces, debido a la esbeltez de la lámina – muy delgada en

29

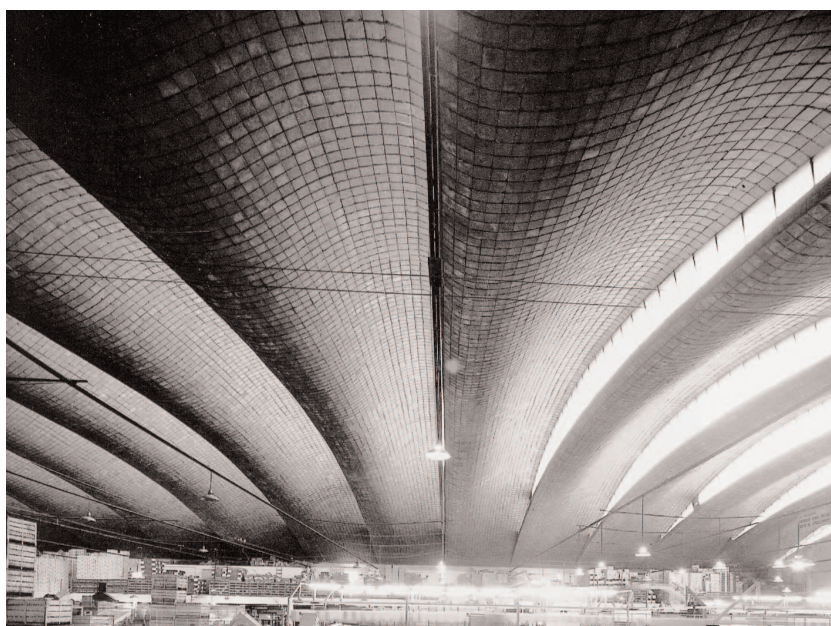


Fig. 28. Esquemas de bóvedas *gausas*. Fuente: A.A.V.V.: *Eladio Dieste 1943-1996*. pág. 44.

Fig. 29. Vista de una bóveda *gausa* desde un lateral. Fuente: op. cit. pág. 57.

comparación con el desarrollo de su sección transversal – es el de la flexión y el pandeo. Para afrontarlo, tal como explica Dieste, conviene aumentar la rigidez de la lámina.

Ello se consigue dándole a la bóveda una sección longitudinal ondulada de manera que la amplitud de la onda de la bóveda se hace variable desde un máximo en la clave hasta cero en los dos bordes rectos laterales de apoyo de la bóveda.

Vemos pues de nuevo aquí cómo la forma contribuye de forma decisiva en la función resistente de la bóveda. El principio rigidizador de la bóveda se resuelve mediante la geometría de la *doble curvatura* que adquiere la lámina con las catenarias transversales y las ondulaciones de amplitud variable longitudinales.

Encontramos pues de nuevo aquí otro principio estructurador de la forma rigidizadora de una lámina: la *doble curvatura*.

30



Este principio, se puede aplicar de manera que la cubierta quede formada por una serie de piezas gemelas dispuestas en la misma posición, de tal manera que las láminas de doble curvatura formen una abertura entre ellas que proporcione iluminación al interior. Ejemplos de este tipo de bóvedas los encontramos en naves como la del pabellón de productores del mercado de Porto Alegre, en Brasil, de 47 m. de luz, construida en 1972, o la del depósito Julio Herrera en el puerto de Montevideo, de 50 m. de luz, construida en 1979.

Así pues, la forma en doble curvatura de los elementos laminares de estas cubiertas al mismo tiempo que rigidiza esas delgadas y ligeras láminas de cerámica armada resuelve la entrada de luz al interior de estas naves. Forma, función resistente e iluminación se funden en un mismo diseño.

El material – la cerámica armada – con su color y textura le confieren al ambiente una calidez que no ofrecen las láminas de hormigón armado. El



32

31



Fig. 30. Vista exterior de la cubierta del depósito Julio Herrera. Fuente: op. cit. pág. 76.
 Fig. 31. Mercado de Porto Alegre. Fuente: op. cit. pág. 63.
 Fig. 32. Depósito Julio Herrera. Vista interior. Fuente: op. cit. pág. 77.

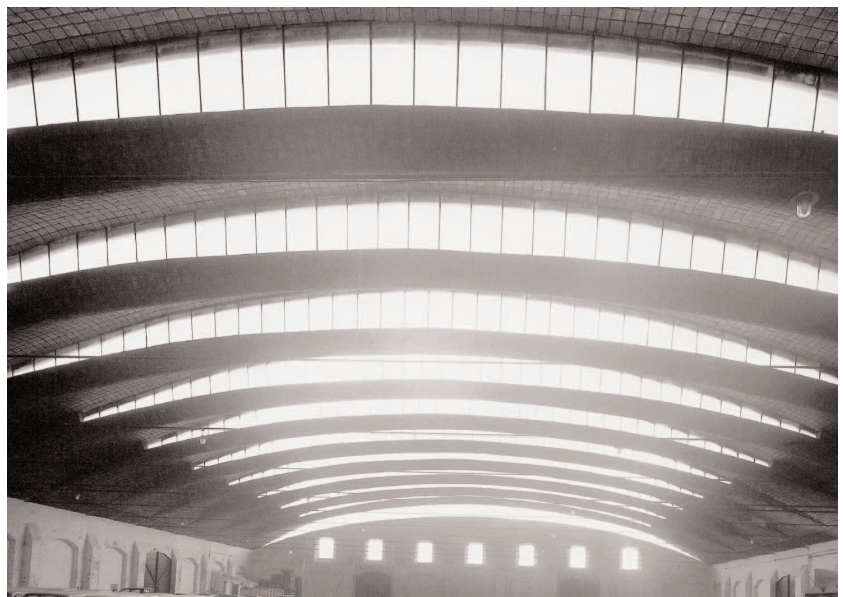
espacio adquiere una calidad arquitectónica poco frecuente en este tipo de edificios industriales.

Ejemplo todavía más elocuente de esta cualificación del espacio que ofrecen estas formas y este material lo podemos encontrar en otra obra paradigmática de Dieste: la iglesia de Atlántida, de 1960. Esta iglesia se concibió como una gran



33

34



cáscara de doble curvatura, que engloba un espacio interior de planta basilical.

Las paredes forman la estructura portante y están constituidas por una sucesión de conoides de directriz recta a nivel del suelo y ondulada en su parte superior, que enlazan con la bóveda gausa, aquí desarrollada en continuidad, sin lucernarios, formando el conjunto una sección transversal que nos recuerda los pórticos de elementos lineales – pilares y vigas – pero esta vez constituidos por elementos laminares, superficiales, cuya geometría propia – superficies regladas y superficies de doble curvatura – es la que confiere rigidez a los encuentros.

Forma, materia, espacio y percepción visual constituyen una síntesis indisoluble de la que surge el valor estético de la obra. El ladrillo es el material envolvente, presente en elementos muy diferentes: suelo, paredes, techo, escalera, barandillas, asumiendo múltiples significados, valorado en gradaciones diversas de color y texturas, según las incidencias de la luz.

35



Fig. 33. Depósito Julio Herrera. Vista longitudinal interior. Fuente: op. cit. pág. 80.

Fig. 34. Depósito Julio Herrera. Vista longitudinal interior inversa. Fuente: op. cit. pág. 81.

Fig. 35. Depósito Julio Herrera. Vista interior. Fuente: op. cit. pág. 243.



36

37

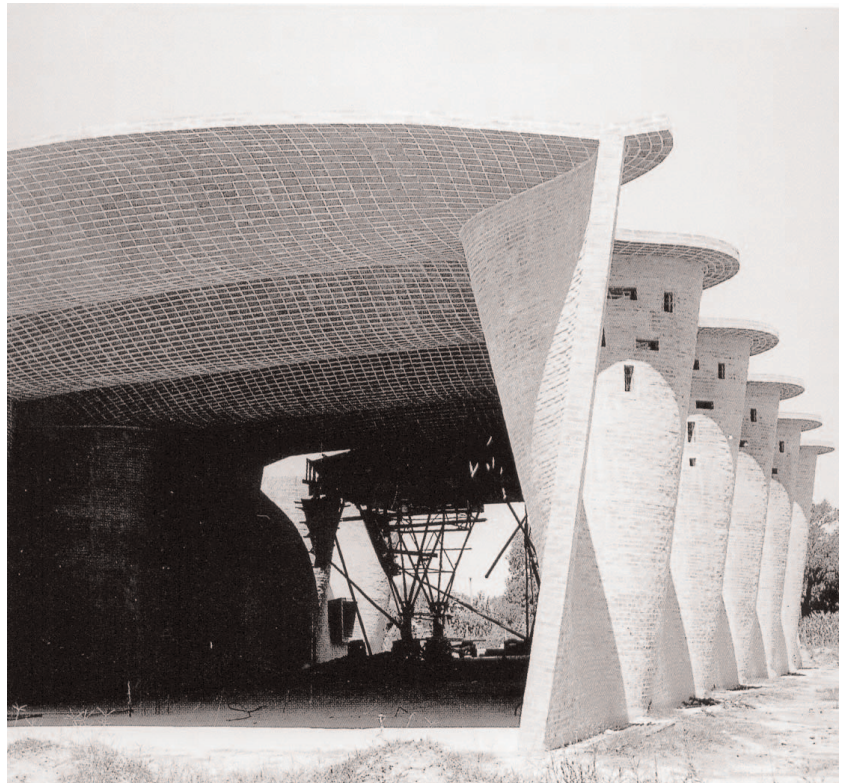


Fig. 36. Paredes laterales de la iglesia de Atlántida. Fuente: op. cit. pág. 154.

Fig. 37. Iglesia de Atlántida. Paredes laterales y bóveda. Fuente: op. cit. pág. 154.

Fig. 38. Iglesia de Atlántida. Encuentro interior entre paredes y bóveda. Fuente: op. cit. pág. 151.

Fig. 39. Iglesia de Atlántida. Perspectiva interior general hacia el altar. Fuente: op. cit. pág. 167.

Esta obra temprana (1958-1960) revela con claridad la existencia de una sensibilidad estética, de una cultura visual en la formación de Eladio Dieste. Sensibilidad que también se ve reflejada en su pensamiento, como muestran estas palabras, tomadas de uno de sus escritos, en las que afloran cuestiones como la observación de los fenómenos y las leyes de la física, la economía cósmica o la relación entre forma y estructura, que conectan con principios y planteamientos esenciales en la experiencia de Frei Otto y su instituto:

“Nuestro espíritu debe percibir en [las grandes construcciones] una adecuación sutil de lo construido a las leyes que rigen la materia en equilibrio, lo que supone una actitud de respeto y reverencia frente al prójimo y frente a lo real. Nada de descuido y despilfarro; sólo así se llega a conseguir lo que llamábamos economía en un sentido cósmico, que supone acuerdo con ese inasible misterio que es el universo. Y en el proceso de búsqueda de una viva racionalidad constructiva nos veremos siempre lleva-



38

39

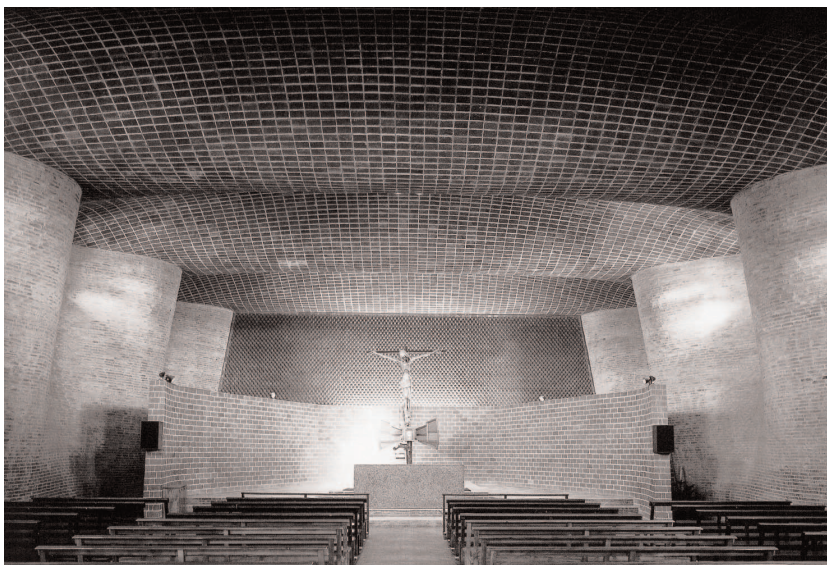


Fig. 40. Iglesia de Atlántida. Detalle de barandillas, escalera y parasoles. Fuente: op. cit. pág. 275.

dos a resistir con la forma de aquello que construyamos, no con una torpe acumulación de materia; nada hay más noble y elegante, desde un punto de vista a la vez espiritual y práctico, que resistir con la forma, y tampoco nada que suponga un mayor desafío a nuestra inventiva, pero también a nuestra humildad frente a lo real”¹⁶

40



¹⁶ DIESTE, Eladio: “Estética y diseño en ingeniería”, en revista *Obra Pública*, nº7/8. Barcelona, 1988. Pág. 93

**III. Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart.
El desarrollo de una experiencia metodológica e investigadora en la
búsqueda de la forma resistente.**

La aportación de Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart, por él fundado y dirigido, enlaza con la tradición de los ingenieros en la búsqueda de la forma resistente siguiendo el desarrollo de los nuevos materiales a partir de la Revolución Industrial.

Tal como hemos señalado, uno de los aspectos más característicos de la nueva profesión de ingeniero civil desde su aparición a mediados del siglo XVIII, ha sido el afrontar el diseño de sus obras siguiendo un criterio de economía de medios, que impulsaba al ingeniero a buscar la optimización de la respuesta resistente de los nuevos materiales, llevándolos al límite de sus posibilidades, a partir de un conocimiento riguroso de sus propiedades y características mecánicas¹⁷.

En este proceso de optimización de la respuesta resistente del material la forma será un factor clave. La correlación lógica, según las leyes de la estática, entre forma y estructura, favorecerá esa integración o síntesis entre ambas, que hemos analizado con algunos ejemplos en el capítulo anterior. La forma desde este planteamiento no se concibe como un *a priori*, sino como una consecuencia, como resultado de un proceso de búsqueda en el que lo resistente tiene la exigencia de ser desvelado formalmente.

Por otro lado, el papel de la ciencia en la formación de los ingenieros asume una importancia crucial, de manera que la ingeniería se caracterizará

¹⁷ Véase MANTEROLA, J.: "Arquitectos-ingenieros. El futuro de los puentes", en *Revista de Obras Públicas*. Nº 3.366. Junio de 1997. Pág. 18-20.

desde sus inicios por la utilización del procedimiento científico para afrontar sus obras, lo que llegará a producir un cambio sustancial en el universo de las formas construidas.

Siguiendo el mismo planteamiento globalizador de las formas y los objetos que encontramos en las reflexiones de Frei Otto, y que a su vez revela la búsqueda de unos principios comunes entre los objetos de la naturaleza y los objetos creados por el hombre, se podría insertar la experiencia de Frei Otto y su instituto, al igual que la tradición de los ingenieros en la búsqueda de la forma resistente, dentro de un contexto más amplio como es el de la evolución de las estructuras en la naturaleza. Matila C. Ghyka, investigador de importancia clave en el campo de las relaciones entre la naturaleza y las artes, entre el arte y la ciencia, recoge en su obra *Estética de las proporciones en la naturaleza y en las artes*, dos leyes fundamentales que rigen la conformación de las estructuras en la naturaleza: el principio de la menor acción para el mundo inorgánico, y el de la economía de la sustancia para el orgánico¹⁸.

También otros constructores y teóricos han reconocido este principio de economía en la actividad constructora del hombre. Félix Cardellach, en su obra *Filosofía de las Estructuras*, lo enuncia como la "ley de aligeramiento de masas", o "ley de espiritualización, [...], cuyo *desideratum* estriba en el empleo de la mínima cantidad de materia, haciéndola trabajar uniformemente en todas las regiones al máxi-

¹⁸ Véase GHYKA, M. C.: *Estética de las proporciones en la naturaleza y en las artes*. Poseidón. Barcelona, 1983 (1927?). Pág. 122, 124 y 125.

mum de su resistencia"¹⁹. Y Félix Candela observa en la historia de las estructuras una "marcada tendencia a cubrir mayores espacios con menos material"²⁰.

Pues bien, planteamos que tanto la obra y la experiencia de Frei Otto y su instituto, como la tradición de los ingenieros en la búsqueda de la forma resistente, se pueden considerar en el contexto de este principio de economía cósmica. En efecto, uno de los principios que han caracterizado toda la obra y la experiencia de Frei Otto desde sus inicios ha sido el principio de la construcción ligera²¹, que él define de forma sintetizada como el modo de construir con un consumo mínimo de medios (materiales, energéticos y económicos)²².

En esta tendencia hacia la ligereza, la aportación de Frei Otto y su instituto enlaza con la tradición de los ingenieros. Después de los logros alcanzados en el siglo XIX con el hierro se va produciendo a lo largo del siglo XX un proceso de aligeramiento de las estructuras de hormigón, cuyo paradigma emblemático serían las cáscaras delgadas de hormigón armado. Las estructuras de cables de acero y membranas desarrolladas por Frei Otto y sus colaboradores representan un salto cualitativo en ese proceso de aligeramiento. En efecto, la posibilidad de dise-

¹⁹ Véase CARDELLACH, F.: *Filosofía de las estructuras*. Editores técnicos asociados. Barcelona, 1970 (1910). Pág. 7.

²⁰ Véase el prólogo de Félix Candela al libro ROLAND, C.: *Frei Otto: Estructuras*. Gustavo Gili. Barcelona, 1973 (1965). Pág. V.

²¹ Las investigaciones de Frei Otto y su instituto sobre este principio están ampliamente desarrolladas y expuestas en el volumen 24 de la serie *Mitteilungen*, del Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart. OTTO, F.: *Prinzip Leichtbau / Lightweight Principle*. Krämer. Stuttgart, 1998. (IL 24).

²² Véase la entrevista realizada a Frei Otto, publicada en A.A.V.V.: *Leicht und Weit*. VCH. Weinheim, 1990. Pág. 273.

ñar estructuras cuyo principal modo de trabajo sea a tracción, evitando los problemas de pandeo de las estructuras comprimidas esbeltas, hace que se puedan cubrir mayores luces con un peso propio muy reducido con relación a las cargas que se deben soportar. La aportación de Frei Otto y su instituto se nos presenta así como el eslabón o la etapa siguiente, después de los logros alcanzados con las cáscaras delgadas de hormigón armado, en ese proceso tendente hacia la ligereza.

Por otro lado, la consideración de la forma como un factor clave para optimizar la respuesta resistente del material, objetivo ya mencionado dentro del proceder característico de los ingenieros, según el cual la forma no se concibe como un *a priori*, sino como resultado de un proceso de búsqueda en el que lo resistente tiene la exigencia de ser desvelado formalmente, conecta con la metodología experimental que ha caracterizado desde sus inicios las investigaciones de Frei Otto y sus colaboradores. En sus procesos de búsqueda, determinación y optimización de la forma resistente por medio de maquetas experimentales que generan estructuras por procesos físicos de autoformación encontramos una filosofía del diseño muy en sintonía con la de la tradición de los ingenieros, siempre basada en la observación de los fenómenos físicos a través del método científico.

Este mismo espíritu impregnaba también el racionalismo estricto de los inicios de la arquitectura moderna, uno de cuyos exponentes más destacados es el ya mencionado de la Bauhaus. La aportación de Frei Otto y sus colaboradores representa un nexo de continuidad con esa ética de austeridad de formas, de economía de medios, de descubrimiento de

la esencia de lo resistente, en una búsqueda desde la autenticidad, la sinceridad, la necesidad, la discreción y la responsabilidad social, tan alejadas de las pretensiones de expresividad estructural del *High Tech* actual.

Por último es importante señalar también, como enlace con la tradición de los ingenieros, el papel que la investigación y la interdisciplinariedad han asumido en la actividad de Frei Otto y su instituto. En repetidas ocasiones ha planteado Frei Otto la necesidad de un enfoque interdisciplinar para la investigación en la arquitectura, que salve la división artificial entre las artes y las ciencias y el prejuicio de la autonomía de la disciplina arquitectónica. Su propia metodología experimental supone una comprensión científica del proceso de generación de la forma, y sus investigaciones sobre las estructuras naturales han sido exponente de su ansia de saber y establecer conexiones con otras disciplinas desde un planteamiento globalizador, que ha llevado a una presencia constante de especialistas de muy distintos campos entre los colaboradores de Frei Otto a lo largo de toda su trayectoria.

Es necesario resaltar la importancia de los colaboradores de Frei Otto en las diferentes instituciones de trabajo en grupo por él fundadas y dirigidas a lo largo de su trayectoria profesional. Tanto en el "Centro para el Desarrollo de la Construcción Ligera" de Berlín, como en el grupo de investigación "Biología y Construcción", como en el "Instituto de Estructuras Ligeras" de Stuttgart, o como en su propio estudio de arquitectura en Warmbronn, sus colaboradores, auténticos grupos interdisciplinares, han sido una base fundamental para el desarrollo y la ejecu-

ción de toda la ingente labor investigadora realizada. Una labor, cuya importancia en la arquitectura de la segunda mitad del siglo XX todavía no ha sido suficientemente reconocida, que perfila a Frei Otto y sus colaboradores como auténticos continuadores de los planteamientos racionalizadores de la arquitectura que inspiraron la filosofía de los inicios de la arquitectura moderna en los años veinte.

Planteamos a continuación un recorrido histórico por la biografía de Frei Otto y la experiencia del Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart con el fin de rastrear los orígenes, el desarrollo y la permanencia en el tiempo de los temas que han sido objeto de sus investigaciones, así como de la metodología investigadora que esas áreas de interés han ido configurando.

III.1. Biografía de Frei Otto.

Frei Otto nace el 31 de mayo de 1925 en Siegmar, junto a la ciudad de Chemnitz, en el estado alemán de Sajonia. Su padre y su abuelo eran escultores. Un profesor despierta en él entusiasmo por el vuelo sin motor y el aeromodelismo (1936).

- 1937 Su familia fija su residencia en Berlín.
- 1941-1942 Práctica del vuelo sin motor los domingos, y en vacaciones aprendizaje de cantería. Obtención de la licencia de vuelo.
- 1943 Finaliza sus estudios medios. Ingresas en el ejército.
- 1944 Formación como piloto de caza.
- 1945-1947 Prisionero de guerra en Chartres, Francia. Arquitecto del campo de prisioneros. Inicio de sus estudios sobre estructuras mínimas y el principio de la construcción ligera.
- 1948-1952 Estudia la carrera de arquitectura en la Universidad Técnica de Berlín con los profesores H. Freese, H. Bickenbach y G. Jobst. Becario de la "*Studienstiftung des deutschen Volkes*".
- 1950 Viaje de estudios a los Estados Unidos de América. Dos meses de estudio en la Universidad de Virginia, Charlottesville. Visita a los estudios de Wright, Mendelsohn, Saarinen, Mies van der Rohe, Neutra, Eames. Conoce en el estudio del ingeniero Fred Severud el proyecto de las Arenas de Raleigh.
- 1952 Título de Arquitecto. Abre su propio estudio en Berlín.

- 1953 Presenta su tesis doctoral sobre "las cubiertas colgantes".
- 1954 Obtiene el título de doctor en ingeniería. Se publica su tesis como libro titulado "Das hängende Dach", traducido en 1958 al castellano con el título "Cubiertas colgantes".
- 1954 Inicio de la asesoría y colaboración con Peter Stromeyer, de la empresa de carpas y tiendas L. Stromeyer & Co., ubicada en Constanza.
- 1957 Fundación del "Entwicklungsstätte für den Leichtbau" (EL, Centro para el desarrollo de la construcción ligera), en Berlín.
- 1958 Profesor visitante en la *Washington University* de St. Louis (USA). Seminario sobre estructuras ligeras.
- 1959 Profesor invitado en la *Hochschule für Gestaltung* de Ulm.
- 1960 Profesor visitante en la *Yale University*, New Haven (USA).
- 1961 Profesor ayudante en la cátedra de Peter Poelzig en la Universidad Técnica de Berlín. Fundación, con el biólogo y antropólogo Johann Gerhard Helmcke, del grupo de investigación "Biologie und Bauen" (Biología y Construcción).
- 1962 Seminario extraordinario sobre estructuras mínimas en la Universidad Técnica de Berlín.
Profesor visitante en la Universidad de California, Berkeley (USA), así como en el M.I.T. y en la Universidad de Harvard, Cambridge (USA).
Seminario en la Universidad del Zulia, Maracaibo (Venezuela).
- 1964 Fundación del *Institut für leichte*

- Flächentragwerke* (IL, Instituto de Estructuras Ligeras), en la Universidad de Stuttgart.
- Seminario a distancia para la Universidad del Zulia, Maracaibo (Venezuela).
- 1965 Nombramiento de profesor honorario en la Universidad de Stuttgart. Seminario en el *National Institute of Design*, Ahmedabad (India).
- 1967 Premio Perret de la Unión Internacional de Arquitectos (Conjuntamente con Rolf Gutbrod). Premio "Kunstpreis für Architektur" de la ciudad de Berlín.
- 1968 Fundación del taller-estudio en Warmbronn para el asesoramiento y consultoría sobre estructuras ligeras.
Miembro honorario del *American Institute of Architects*.
- 1969 Miembro fundador del programa de investigación SFB 64 "Weitgespannte Flächentragwerke" (Estructuras de grandes luces), auspiciado por el gobierno alemán.
- 1971 Director de la sección de arquitectura de la Academia Internacional de Verano de Artes Plásticas de Salzburg. Premio Paul Bonatz de la ciudad de Stuttgart por el trabajo del Instituto de Estructuras Ligeras.
Gran exposición en el Museo de Arte Moderno de Nueva York, que se llevó por varios continentes hasta 1981.
- 1973 Doctor honoris causa por la *Washington University*, Saint Louis.
- 1974 Medalla de Arquitectura de la *Thomas Jefferson Memorial Foundation*, de la Universidad de Virginia, Charlottesville.

- 1976 Profesor ordinario en la Universidad de Stuttgart.
- 1978 Premio Hugo Häring, conjuntamente con Carlfried Mutschler, por el pabellón para la *Bundesgartenschau* de 1975 en Mannheim.
- 1979 Premio "*Deutscher Holzbaupreis*", conjuntamente con Carlfried Mutschler, por el pabellón para la *Bundesgartenschau* de 1975 en Mannheim.
Seminarios en Singapur e Indonesia.
- 1980 Doctor honoris causa de la Universidad de Bath (Inglaterra).
Premio Aga Kahn de Arquitectura, conjuntamente con Rolf Gutbrod, por el centro de conferencias de la Meca.
Seminarios en Australia.
- 1981 Exposición "Estructuras naturales", Instituto de Relaciones Exteriores, Stuttgart, e Institutos Goethe en unos 80 países.
- 1982 Medalla de la investigación y de la técnica, de la Academia de Arquitectura, París.
Miembro honorario del *Royal Institute of British Architects*.
- 1982 Gran Premio del *Bund Deutscher Architekten*, Biberach.
- 1983 Miembro de la *Accademia di Archeologica Lettere e Arti*, Nápoles.
Miembro de la Academia de Arquitectura, París.
- 1984 Miembro fundador del programa de investigación SFB 230 "*Natürliche Konstruktionen*" (Estructuras naturales), auspiciado por el gobierno alemán.

- 1985 Concluye el programa de investigación SFB 64 "*Weitgespannte Flächentragwerke*" (Estructuras de grandes luces).
- 1986 Miembro honorario de la *Institution of Structural Engineers*, Londres.
- 1987 Miembro de la *International Academy of Architecture*.
- 1989 Premio *Sofia International Design Award*, Osaka.
- 1990 Doctor honoris causa por la Universidad de Essen.
Premio *Honda Prize for Ecotechnology* de la Fundación Honda, Tokio.
- 1991 Se retira como profesor y director del *Institut für leichte Flächentragwerke* (IL, Instituto de Estructuras Ligeras), de la Universidad de Stuttgart.
- 1992 Premio *Deutscher Werkbund Bayern Preis*. Exposición en la Villa Stuck, Munich.
- 1994 Premio *Sustainable Community Solutions Award*, conjuntamente con Richard Burton (AIA), USA.
- 1995 Concluye el programa de investigación SFB 230 "*Natürliche Konstruktionen*" (Estructuras naturales).
- 1996 Gran Premio del *Deutscher Architekten- und Ingenieurverband*, Berlín.
- 1997 Premio Aga Kahn de Arquitectura por el club diplomático del Palacio Tuwaiq en Riad.
Wolf Prize in Arts de la *Wolf Foundation*, Jerusalén.
- 2001 Exposición de obras seleccionadas de Frei Otto y sus equipos, 1955-2000, Leonberg.

Las notas biográficas que en forma esquemática hemos presentado en este apartado han sido extraídas y sintetizadas de las siguientes publicaciones, relacionadas por orden cronológico:

ROLAND, Conrad: *Frei Otto - Estructuras: Estudios y trabajos sobre la construcción ligera*. Gustavo Gili. Barcelona, 1973 (1965).

DREW, Philip: *Frei Otto: Form and Structure*. Crosby Lockwood Staples. London, 1976.

BURKHARDT, Berthold (ed.): *Schriften und Reden: 1951 – 1983 / Frei Otto*. Vieweg. Braunschweig, 1984.

WILHELM, Karin: *Portrait Frei Otto*. Quadriga-Verlag Severin. Berlin, 1985. (Architekten heute ; 2). Se ha tenido en cuenta especialmente el escrito autobiográfico de Frei Otto incluido en esta publicación titulado "Subjektives und Kritisches zu dem, was andere als mein Werk bezeichnen".

SCHANZ, Sabine (ed.): *Frei Otto, Bodo Rasch: Finding Form. Towards an Architecture of the Minimal*. Axel Menges. 1995.

OSSOWSKI, Christina (ed.): *Geplante Poesie: ausgewählte Arbeiten von Frei Otto und seinen Teams, 1955 - 2000*. Stadt Leonberg. Leonberg, 2001.

III.2. Obras y proyectos.

- 1951 **Sala de conciertos junto al Lietzensee, Berlín.**
Primer proyecto con una cubierta colgante. No construido.
- 1953-1954 **Iglesia evangélica para una misión en Africa.**
Proyecto de carpa ondulada. No construido.
Frei Otto con L. Stromeyer & Co.
- 1954 **Aula para el liceo francés de Berlín.**
Cubierta colgante.
Proyecto no construido. Frei Otto con Hansrudolf Plarre.
- 1954-1955 **Cubierta para el teatro al aire libre de Killesberg, Stuttgart.**
Proyecto no construido. Frei Otto con L. Stromeyer & co.
Propuesta inicial: Membrana ondulada radial fija.
Propuesta final: membrana plegable soportada por una red de cables tensada por un arco vertical y dos horizontales.
- 1955 **Pabellones para la Exposición Federal de Jardinería de Kassel.**
Obra construida. Frei Otto con Hermann Mattern, Siegfried Lohs y Peter Stromeyer.
Carpa alabeada tetrapuntual, carpa ondulada en estrella, y toldos fungiformes.
- 1956 **Carpas onduladas para hangares,** para L. Stromeyer & Co.
Marquesina para la entrada del hotel Selighof en Baden-Baden. Obra construida.

- Frei Otto con L. Stromeyer & Co. Membrana alabeada tetrapuntual.
- 1957 **Pabellones para la Exposición Federal de Jardinería de Colonia.** Proyecto parcialmente construido. Frei Otto con Ewald Bubner, Siegfried Lohs, Dieter Frank, L. Stromeyer & Co. y F. Leonhardt & Ändra. Arco de entrada, carpa ondulada radial para la pista de baile, carpa apuntada y carpa entibada.
- 1957 **Salas de exposición, cafetería, restaurante y cubierta de protección de la orquesta en la Interbau de Berlín.**
Obra construida. Frei Otto con Karl Otto, Günter Günschel, Ewald Bubner, Karl Heinz Bubner, Siegfried Lohs, Dieter Frank y H. Haseloff. Carpas entibadas, carpas alabeadas tetrapuntuales y carpa de doble inversión.
Pabellón municipal en Bremen.
Proyecto de concurso no construido. Frei Otto con Hans Budde y Carsten Schröck. Cubierta de red de cables tensada y apoyada en tres arcos con diferentes inclinaciones.
- 1958 **Cubierta para un teatro ambulante en la Exposición Universal de Bruselas.** Proyecto no construido. Frei Otto con L. Stromeyer & Co. Carpa ondulada en estrella.
- 1959 **Taller para el Entwicklungsstätte für den Leichtbau (Centro para el desarrollo de la construcción ligera) en Berlín.**
Obra construida.
- 1960 **Parvulario para la iglesia evangélica de Berlín-Schönow.**
Frei Otto con Ewald Bubner.

1960-1961 **Cubierta para teatro al aire libre en Nimega, Holanda.**

Proyecto no construido. Frei Otto con Hans Wehrhahn.

Membrana plegable colgada de una red de haces radiales de cables soportada por tres mástiles y anclada en el suelo.

1961 **Cubierta sobre un muelle en el puerto de Bremen.**

Proyecto no construido. Frei Otto con Hans Budde, Dirk Heinrichs, Carsten Schröck, Hans Wehrhahn y Peter Voigt.

Dos sistemas de redes de cables suspendidos de mástiles.

1962 **Cubierta experimental para la feria alemana de la construcción (DEUBAU) en Essen.**

Obra construida. Frei Otto con John Koch, Eva Pietsch y Bernd Friedrich Romberg.

Bóveda de celosía de capa única y malla cuadrangular.

1962 **Cubierta para teatro al aire libre en Wunsiedel.**

Proyecto no construido. Frei Otto con Hans Habermann, John Koch y Gernot Minke.

Red de cables con puntos de suspensión interiores soportados por mástiles exteriores.

1963 **Pabellones para la Exposición Internacional de Jardinería en Hamburgo.**

Obra construida. Frei Otto con Hans Heinrich Habermann, Christian Hertling, John Koch y L. Stromeyer & Co. Carpas onduladas paralelas y radiales y carpa de doble inversión.

Campanario para la iglesia evangélica en Berlín-Schönow. Obra construida. Ewald

Bubner con Frei Otto.

Celosía espacial formada por módulos cúbicos con nudos rígidos de chapa de acero.

Modelo de mástil o brazo móvil articulado.

Obra construida.

Barra flexible de acero con vértebras de plexiglás rígidamente unidas a la barra, sujetas y dirigidas por cables.

Cubierta sobre una pista de hielo en Dortmund.

Proyecto no construido. Frei Otto con John Reuer, para L. Stromeyer & Co. Red de cables ondulada radial con mástil interior suspendido por cables principales.

Pabellón "Nieve y Rocas" para la Exposición Nacional Suiza de 1964 en Lausana.

Obra construida. Marc Saugey con Frei Otto, Christian Hertling, Bernd Friedrich Romberg y Uwe Röder.

Estructura apuntada de redes de cables alabeadas recubiertas por una membrana.

1964

Cubierta para teatro al aire libre en Heppenheim.

Proyecto no construido. Frei Otto con John Reuer, Bernd Friedrich Romberg y H. Seifert. Membrana plegable suspendida puntualmente de una estructura metálica en voladizo.

1965

Cubierta para el teatro al aire libre Masque de Fer en Cannes.

Obra construida. Robert Tallibert con Frei Otto, Bernd Friedrich Romberg y A. Edzard. Membrana plegable colgada de un haz radial y cónico de cables cuyo vértice está soportado por un mástil exterior inclinado y curvado.

Iglesia evangélica en la Gropiusstadt, Berlín. Proyecto de concurso no construido. Templo, parvulario y oficinas bajo una sola cubierta en forma de tienda apuntada soportada por un mástil interior con cables en forma de lazo y limatesa.

1965-1967 **Pabellón alemán en la Exposición Universal de 1967 en Montreal.**

Obra construida. Frei Otto con Rolf Gutbrod, Hermann Kendel, Hermann Kiess, Larry Medlin, Berthold Burkhardt, Eberhard Haug, Leonhardt & Andrä, L. Stromeyer & Co., et alt.

Cubierta de red pretensada de cables de acero con picos y depresiones, de la que cuelga una membrana de poliéster translúcido.

Plataformas formadas por estructura espacial de perfiles de acero en doble T con perfil longitudinal triangular.

Bóvedas de celosía de capa única y malla cuadrangular cubierta con tablero contrachapado con aislamiento e impermeabilización, para la sala de conferencias y teatro.

1966-1967 **Cubierta para la tribuna del estadio de Gelsenkirchen.**

Proyecto no construido. Frei Otto con Bernd Friedrich Romberg, Uwe Röder, Brückner, Duwe y Klement.

Red pretensada de cables suspendida de mástiles, anclada al suelo en el lado trasero, con borde delantero de haz de cables anclado al suelo en ambos extremos, y mástiles interiores suspendidos por cables aéreos.

- 1967 **Pabellón de la India en la Exposición Universal de 1970 en Osaka.** Proyecto no construido. Frei Otto con Dasharat Patel y Bernd Friedrich Romberg. Red de cables tridimensional, con plataformas pisables suspendidas de ella, con tensores interiores y puntales extensores, soportada por mástil central.
- 1967-1968 **Cubierta para teatro al aire libre en las ruinas del monasterio de Bad Hersfeld.** Obra construida. Frei Otto con Ewald Bubner, Bernd Friedrich Romberg, Uwe Röder y L. Stromeyer & Co.
Membrana plegable colgada de un haz radial de cables soportado por un mástil exterior vertical atirantado al suelo.
- Sede del Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart.**
Obra construida. Frei Otto con Berthold Burkhardt, Friedemann Kugel, Gernot Minke y Bodo Rasch jun. Reconstrucción y adaptación de la estructura de prueba del pabellón de la Expo 67 en una ubicación definitiva para el IL.
Cubierta de red pretensada de cables en forma de tienda apuntada soportada por un mástil interior con cable intermedio en forma de lazo, limatesa y cables de borde. Plataformas formadas por estructura espacial de perfiles de acero en doble T con perfil longitudinal triangular.
- 1968-1971 **Cubierta para pista de hielo en Conflans St. Honorine, Francia.**
Obra construida. J. Blasco y D. Girard con Frei Otto, Ewald Bubner, Rob Krier y Bernd Oleiko. Membrana plegable colgada de

arcos de celosía espacial dispuestos radialmente.

1967-1969 **Vivienda y estudio de Frei Otto en Warmbronn, Stuttgart.**

Obra construida. Frei Otto con Rob Krier. Dos edificaciones separadas construidas sobre una pendiente orientada al sur. Parte superior vivienda con gran cristalera envolvente en la parte central y pública, y toldo desplegable de protección solar. Parte inferior invernadero con estudio, taller y garaje.

1968-1974 **Hotel y centro de conferencias en La Meca, Arabia Saudí.**

Obra construida. Rolf Gutbrod con Amine Charif, Armin Claar, Hermann Kendel y Frei Otto. Cálculo estructural: Ove Arup & Partners – Edmund Happold y Peter Rice. Cubiertas colgantes pesadas y flexibles formadas por cables y barras rígidas, en las salas de conferencias. Ombráculos de rejillas soportadas por vigas apoyadas en cerchas de cables radiales, y, en otro lugar, en una retícula ortogonal de pilares tubulares de acero.

1968-1972 **Cubiertas para el parque olímpico de Munich.**

Obra construida.

Proyecto de concurso: Günter Behnisch, Fritz Auer, Winfried Büxel, Erhard Tränkner, Karlheinz Weber y Jürgen Joedicke.

Planificación de la ejecución: Behnisch & Partner.

Asesoramiento técnico para el desarrollo del proyecto: Frei Otto y Ewald Bubner.

Investigaciones sobre maquetas: Instituto

de Estructuras Ligeras de Stuttgart (Frei Otto con Berthold Burkhardt, Dieter Godel, Rolf Wiborg Groehler, Ulrich Hangleiter, Jürgen Hennicke, Christian Hesse, Matthias Kreuz, Friedemann Kugel, Fritz Lausberger, Franz Mohr, Franz Stockert, Hans-Peter Winter y Günther Zwick).

Cálculo y desarrollo de detalles estructurales: Leonhardt y Andrä. Director de proyecto: Jörg Schlaich.

Fotogrametría y cálculos matemáticos: Klaus Linkwitz con Hans-Dieter Preuss, y John H. Argyris con Th. Angelopoulos.

Asesoramiento técnico de materiales: Wilhelm Schaupp.

Estructura pretensada de red de cables suspendida de mástiles, con cables de borde y anclajes en el suelo, cubierta con membrana transparente de placas de vidrio acrílico.

1969

Centro deportivo en Kuwait.

Proyecto no construido. Kenzo Tange & URTEC con Frei Otto.

Redes de cables estabilizadas por arcos de compresión.

Pasarela peatonal en Berlín-Wilmersdorf.

Proyecto no construido. Frei Otto y Ewald Bubner con Bernd Oleiko y Einar Thorsteinn. Estructura pretensada tridimensional de cables entre dos pares de soportes formando ángulos en V.

1969-1970

Grandes paraguas para la Exposición Federal de Jardinería de 1971 en Colonia.

Obra construida. Frei Otto y Ewald Bubner con Bodo Rasch, jun. Doseles plegables formados por un entramado extensible de

- perfiles de acero con membrana inferior de tejido de poliéster revestido de PVC.
- 1970 **Cubierta para el estadio olímpico de Berlín.**
Proyecto no construido. Frei Otto y Bernd Oleiko con la oficina de Rolf Gutbrod. Cubierta colgante pesada formada por cables y barras rígidas suspendidos de dos mástiles tubulares inclinados con tirantes anclados en el exterior.
- 1970 **Gran espacio multimedia (Estadio Hoechst).**
Proyecto no construido. Frei Otto con Berthold Burkhardt, Mike Eekhout, Richard Plate y Bodo Rasch jun. Cubierta plegable formada por membrana colgada de un haz radial de cables soportado por dos mástiles inclinados exteriores que forman en la base un ángulo de 90° atirantados al suelo.
- 1970-1971 **Ciudad en el Artico.** Proyecto no construido. Frei Otto y Ewald Bubner con Wolf Bienhaus, Bernd Oleiko y Einar Thorsteinn; Kenzo Tange & URTEC con Koji Kamiya. Ingenieros: Ove Arup & Partners – Edmund Happold, et al. Membrana doble transparente reforzada por una red de cables formando una cúpula neumática estabilizada por sobrepresión interior cubriendo una ciudad con un diámetro de unos 2 kilómetros.
- 1970-1972 **Cubierta para una piscina en Regensburg.**
Obra construida. Proyecto: Schmatz, Schmid, Mehr y Eckel. Asesoramiento: Frei Otto y Ewald Bubner.
Membrana plegable colgada de un haz

- radial de cables soportado por un mástil inclinado exterior atirantado al suelo.
- 1972 **Sombra en el desierto.**
Proyecto no construido. Frei Otto y Ewald Bubner con Andrea Bienhaus, Wolf Bienhaus, Denis Hadjidimos y Alf v. Lieven; Rolf Gutbrod con Hermann Kendel.
Ombráculos de redes de plástico sobre cultivos agrícolas formados por módulos horizontales cuadrados agregables soportados por cuatro mástiles verticales.
- 1972-1973 **Centro cultural y mercado en Abidjan, Costa de Marfil.**
Proyecto no construido. Rolf Gutbrod con Martin Gentges, Hermann Kendel y Bernd Riede; Frei Otto y Ewald Bubner con Matthias Banz, Jean Goedert y Alf v. Lieven.
Red de cables envolvente de todo el conjunto soportada por 8 mástiles, de los cuales 4 con bóvedas de celosía en las puntas.
- 1973 **Prototipo de tienda "Sarabhai", India.**
Obra construida. Frei Otto con Ewald Bubner, Matthias Banz, Jean Goedert, Alf v. Lieven, Georgios Papakostas, Geoffrey Wright y Nicholas Goldsmith.
Tienda con estructura de armazón de barras tubulares de aluminio y cubierta de membrana de lona con puntas y depresiones formando un módulo cuadrado de 4 x 4 m. agregable para cubrir cualquier extensión.

1973-1974 **Pabellón con sala multiuso y restaurante para la Exposición Federal de Jardinería de 1975 en Mannheim.**

Obra construida. Carlfried Mutschler, Joachim Langner y Dieter Wessa con Wolfgang Langner; Frei Otto y Ewald Bubner con Matthias Banz, Jean Goedert, Alf v. Lieven y Georgios Papakostas. Ingenieros: Ove Arup & Partners – Edmund Happold.

Bóveda de celosía de listones de madera, de malla cuadrada antifunicular, cubierta con tejido de poliéster traslúcido revestido de PVC.

1974 **Cubierta del escenario de un teatro al aire libre en Scarborough, Inglaterra.**

Proyecto no construido.

Frei Otto y Ewald Bubner con Matthias Banz, Jean Goedert y Georgios Papakostas.

Carpa desmontable de tejido revestido de PVC transparente soportada por barras inclinadas colgadas de mástiles verticales exteriores atirantados.

Termas en Baden-Baden.

Proyecto no construido.

Rolf Gutbrod con Lutz Buhe, Martin Gentges, Hermann Kendel y Bernd Riede; Frei Otto y Ewald Bubner con Matthias Banz, Jean Goedert y Georgios Papakostas. Ingenieros: Ove Arup & Partners – Edmund Happold.

Cubierta colgante pesada de red soportada por cables, con membranas plegables colgadas.

1974-1980 **Concurso para alojamiento de peregrinos en la Meca.**

Proyecto no construido.

Frei Otto con Ewald Bubner, Sami Angawi, Francisco Baroni, Bodo Rasch jun., Geoffrey Wright y Matthias Banz, Fritz Dressler, Jean Goedert, Dennis Hector, Munir Jundi, Ruth Koch, Sylvia Nestler, Georgios Papakostas, Keizo Sataka, Ilse Schmall.

Plan director de ordenación del valle Muna, ombráculos de redes para calles y plazas, terrazas cubiertas sobre la montaña, puente peatonal de entramado de barras y depósitos neumáticos de agua.

1975 **Carpa ceremonial para Isabel II en Dyce junto a Aberdeen, Escocia.**

Obra construida. Design Research Unit, Frei Otto con Ewald Bubner, Peter Stromeyer & Co. Ingenieros: Ove Arup & Partners – Edmund Happold. Membrana de doble inversión, con protuberancias y depresiones redondeadas.

Grandes paraguas para la gira de conciertos de Pink Floyd.

Obra construida. Frei Otto, Geoffrey Wright, Nicholas Goldsmith, Heinz Doster y la oficina de ingeniería Happold. Cubierta de protección de la lluvia formada por doseles plegables con membranas de tejido de mezcla de algodón alojados bajo el suelo una vez plegados.

1977 **Centro gubernamental (KOCOMMAS) en Riad, Arabia Saudí.**

Proyecto no construido. Rolf Gutbrod, Hermann Kendel, Frei Otto y Johann Fritz.

Oficina de ingeniería Happold y Ove Arup & Partners.

Bóvedas de celosía de malla hexagonal formada por tubos soldados de acero con soportes arborescentes, cubiertas de redes de cables y edificación pesada de varios pisos.

1978-1988 **Proyecto de aeronaves "Airfish".**

Proyecto no construido.

Frei Otto con Rainer Barthel, Heinz Doster y Johannes Fritz. Oficina de ingeniería Happold – Edmund Happold con I. Liddell y el *Aeronautical College Cranfield Institute of Technology*.

Tres modelos de dirigibles no rígidos, cuya parte portante es una estructura neumática de membranas flexibles.

1978-1981 **Pabellón de deportes en Jiddah, Arabia Saudí.**

Obra construida.

Rolf Gutbrod, Wolfgang Henning, Hermann Kendel, Ulrich Jerrentrup, Günter Schnell con Frei Otto, Johannes Fritz, Nicholas Goldsmith. Oficina de ingeniería Happold y Ove Arup & Partners.

Estructura de red pretensada de cables soportada por ocho mástiles tubulares interiores y cubierta con una membrana exterior y otra interior.

1978 **Cubierta para la tribuna de un estadio en Böblingen.**

Proyecto no construido.

Frei Otto, Johannes Fritz, Heinz Doster con Özbeck Arin.

Bóvedas de celosía de madera soportadas por voladizos arborescentes, de perfi-

les tubulares de acero soldados, anclados detrás de la tribuna.

1979-1980 **Pajarera para el parque zoológico Hellabrunn de Munich.**

Obra construida.

Jörg Gribl con Frei Otto, Johannes Fritz y Heinz Doster. Oficina de ingeniería Happold.

Red de alambre de malla cuadrada de 60x 60 mm colgada de diez mástiles tubulares interiores mediante haces de cables y pinzas móviles sujetas a la red.

1980-1994 **Viviendas ecológicas para la Exposición Internacional de Arquitectura de Berlín 1987.**

Obra construida.

Frei Otto, Johannes Fritz, Heinz Doster con Rolf Gutbrod, Hermann Kendel, Wolfgang Henning, Riede. Oficina de ingeniería Happold.

Estructura vertical de pilares y forjados de hormigón armado con núcleo de instalaciones comunes, en la que se pueden levantar células de vivienda de uno o dos pisos adaptables a cada usuario. Aprovechamiento pasivo y activo de la energía solar, con grandes superficies ajardinadas.

1980-1981 **Ciudad en Canadá 58° Norte, Alberta.**

Proyecto no construido.

Frei Otto con Arni Fullerton. Oficina de ingeniería Happold.

Envolvente climatizadora para una ciudad de 40.000 habitantes formada, o bien por estructura neumática de red de cables con membrana transparente, o bien por estructuras de redes de cables

soportadas por mástiles arborescentes con cubrición aislante y transparente.

1981 **Prototipos de tiendas para alojamiento de peregrinos en la montaña y el valle Muna, junto a la Meca.**

Obra construida.

Frei Otto con Sami Angawi, Bodo Rasch jun. Armazón modular de barras tubulares ligeras autoportante, de planta cuadrada (4 x 4 m.), con plataformas de madera contrachapada, patas extensibles y paredes y cubierta de tela.

1982-1988 **Club Diplomático (Palacio Tuwaiq) en Riad, Arabia Saudí.**

Obra construida.

Omrania con Frei Otto, Johannes Fritz, Heinz Doster, A. Hartkorn, C. Lorenz, Bettina Otto. Oficina de ingeniería Happold.

Muralla curva sinuosa de edificaciones dedicadas a funciones institucionales y de recreo rodeando un jardín interior, con tres grandes carpas de membranas de Teflón adosadas al lado exterior de la muralla y dos tiendas de redes de cables adosadas al lado interior. En el centro del jardín tienda de red de cables cubierta con tejas de vidrio coloreadas.

1985 **Cubiertas para la Hooke Park Forest School.**

Obra construida.

Richard Burton, Ahrends, Koralek con Frei Otto, Johannes Fritz, M. Heller, Christine Otto. Oficina de ingeniería Happold.

Carpa de troncos colgados radialmente de un mástil central, bóveda de celosía de madera, y cubiertas a dos aguas forma-

- das por cables paralelos colgados de un cable de cumbrera.
- 1987 **Ampliación del edificio Wilkhahn en Bad Münden.**
Obra construida.
Frei Otto con Christine Otto-Kanstinger, H. Gesting. Ingenieros: Stratman, Speich y Hinkes.
Cubiertas colgadas de dos pares triarticulados centrales en A, simétricamente inclinados, uno a cada lado, y unidos en la base, formando entre ellos lucernario acristalado.
- 1990 **Concurso para el pabellón de Alemania en la Exposición Universal de 1992 en Sevilla.**
Proyecto no construido. Frei Otto con Ingrid Otto, Christine Otto-Kanstinger, et al. Oficina de ingeniería Happold.
Envolvente de cáscara de celosía de metal cubierta de vidrio, formada por varias bóvedas, con varias plataformas incluidas en su interior.
- 1991-1992 **Propuestas de nueva vía para el sistema alemán de tren magnético.**
Proyecto no construido. Frei Otto, Christine Otto-Kanstinger, Ingrid Otto, Dietmar Otto, Edmund Happold, Michael Dickson, Rüdiger Lutz.
Diez tipos estructurales diferentes para viaducto continuo, entre los cuales estructuras arborescentes o sistemas de atirantamiento múltiple que se cruza en el centro del vano.

- 1992 **Cubierta para las ruinas de la Nicolaikirche de Hamburgo.**
Proyecto no construido. Oficina estudio de Frei Otto.
Envolvente de cáscara de celosía formada por varias series de bóvedas alineadas acristaladas dispuestas en tres naves y en planta de cruz latina con bóveda pintada en el crucero.
- 1993 **Concurso para la ampliación de la mezquita de la tumba del imán Bukhari y nuevo centro universitario en Samarcanda.**
Bodo Rasch et alt. Frei Otto, Ingrid Otto, Christine Otto-Kanstinger.
Series de bóvedas enlazadas de fábrica de ladrillo de perfil apuntado, como forma optimizada para mayor resistencia frente a los movimientos sísmicos.
- 1994 **Cubierta ambulante para vertederos de basura nociva.**
Proyecto no construido. Frei Otto con Ingrid Otto, Christine Otto-Kanstinger, Bodo Rasch con B. Gawenat, S. Greiner. Oficina de ingeniería Happold.
Bóveda de protección de red de cables de acero inoxidable sellada con una lámina de plástico reciclable transparente soportada por sobrepresión interior de aire, cuyos bordes están fijados al suelo por terraplenes desplazables.
- 1998-2008 **Transformación de la Estación Central de Stuttgart.**
Proyecto en fase de elaboración.
Ingenhoven Overdiek Kahlen & Partner, con Frei Otto y *Sonderkonstruktionen und*

Leichtbau (dirigido por Jürgen Bradatsch).
Oficinas de ingeniería Happold, y
Leonhardt Andrä und Partner.

Gran bóveda perforada sobre andenes
subterráneos, con diferentes propuestas,
entre ellas bóveda, soportes y perforacio-
nes continuos de hormigón armado, o
bien de piezas comprimidas de granito for-
mando una malla hexagonal antifunicular.

2000

**Pabellón de Japón para la Exposición
Universal de 2000 en Hannover.**

Obra construida. Shigeru Ban con Frei
Otto.

Bóveda de celosía de capa única forma-
da por barras de tubo de cartón, que fue
reutilizado después de la Exposición.

Para una información más detallada acerca de las obras y proyectos presentados en este apartado remitimos a la siguiente bibliografía, ordenada por orden cronológico:

OTTO, Frei: *Cubiertas colgantes*. Labor. Barcelona, 1958 (1954).

ROLAND, Conrad: *Frei Otto - Estructuras: Estudios y trabajos sobre la construcción ligera*. Gustavo Gili. Barcelona, 1973 (1965).

DREW, Philip: *Frei Otto: Form and Structure*. Crosby Lockwood Staples. London, 1976.

OTTO, Frei et al.: *Natürliche Konstruktionen. Formen und Strukturen in Natur und Technik und Prozesse ihrer Entstehung*. Deutsche Verlags-Anstalt. Stuttgart, 1982.

BURKHARDT, Berthold (ed.): *Schriften und Reden: 1951 – 1983 / Frei Otto*. Vieweg. Braunschweig, 1984. Ver anexo con listado de obras y proyectos en páginas 219 a 220.

WILHELM, Karin: *Portrait Frei Otto*. Quadriga-Verlag Severin. Berlin, 1985. (Architekten heute ; 2). Ver especialmente anexo con listado de obras y proyectos en páginas 172 a 183.

SCHANZ, Sabine (ed.): *Frei Otto, Bodo Rasch: Finding Form. Towards an Architecture of the Minimal*. Axel Menges. 1995.

OSSOWSKI, Christina (ed.): *Geplante Poesie: ausgewählte Arbeiten von Frei Otto und seinen Teams, 1955 - 2000*. Stadt Leonberg. Leonberg, 2001.

III.3. Antecedentes experimentales y metodológicos en la formación de Frei Otto.

Al considerar en su conjunto la trayectoria de Frei Otto y sus colaboradores, llama la atención la permanencia a lo largo del tiempo de muchos de los temas que han sido objeto de sus investigaciones y trabajos. El principio de la construcción ligera, las bóvedas de celosía, las estructuras traccionadas o la determinación de la forma por procesos físicos de autogeneración, son cuestiones que encontramos presentes en sus experiencias y en su obra desde sus primeros años de formación como arquitecto. Vamos a recorrer en este apartado algunos de los antecedentes más significativos en los años de formación para poder aproximarnos a los temas que han ocupado de forma más constante sus investigaciones y trabajos.

En primer lugar conviene mencionar los antecedentes familiares. Tanto su padre como su abuelo fueron escultores. El abuelo también estucador. En el recuerdo²³ permanece viva la visión del taller paterno con máquinas para cortar, vaciar y pulir la piedra. Figuras, grabados, lápidas, restos de esculturas, bellas piedras que constituyen un repertorio de variadas composiciones, consistencias, colores y texturas, van formando las bases de un lenguaje visual y de un adiestramiento de la sensibilidad y la percepción. Sus padres eran miembros activos del *Deutscher*

²³ Ver las notas autobiográficas de Frei Otto en el capítulo titulado *Anfang*, de la obra WILHELM, Karin, et al.: *Portrait Frei Otto*. Quadriga-Verlag Severin. Berlín, 1985. Pág. 132.

Werkbund. Nombres como los de Gropius y Mendelsohn permanecen en la memoria de aquellos años de la infancia. Durante las vacaciones y en el tiempo libre, entre 1941 y 1942, inicia su aprendizaje como cantero²⁴. El tallado de la piedra constituirá, al igual que en otros arquitectos la práctica de este u otros oficios artesanales, una experiencia importante para ver cómo se va materializando la forma en el espacio, para desentrañar las estrechas vinculaciones entre la forma y el material. Su padre escribe un "Tratado de materiales para canteros y escultores de la piedra" y un "Manual para canteros"²⁵, cuya reedición revisa Frei Otto entre 1956 y 1958.

Otro aspecto importante que señala el propio Frei Otto para poder entender las bases experimentales y metodológicas de su formación es el impulso irrefrenable para inventar, que se convirtió en una manía al menos desde los ocho años²⁶. Esta tendencia de estar siempre y en todas partes inventando era una actividad con una dinámica propia, una inclinación irreprimible, aunque se opusiera a ella, como una segunda vida o pensamiento que llenaba el tiempo cuando la actividad que se estaba realizando era infrutilizada o no era suficientemente intensa. Ello le ejercitaba para simultanear varias actividades y cambiar rápidamente de ámbito o estructura de pensamiento. También le adiestraba la memoria y la capacidad de combinar, porque a menudo una actividad, de forma totalmente casual, traía la solución para otra. Aquí podríamos encontrar un antece-

²⁴ *Ibidem*. Pág. 146.

²⁵ OTTO, Paul: *Werkstoffkunde für Steinmetzen und Steinbildhauer*. B. F. Voigt. Berlín, y OTTO, Paul: *Handbuch für Steinmetzen*. Ebner. Ulm, 1958 (1939).

²⁶ Ver las notas autobiográficas de Frei Otto en el capítulo titulado *Erfinden*, de la obra WILHELM, Karin, et al.: *Portrait Frei Otto*. Quadriga-Verlag Severin. Berlín, 1985. Pág. 134.

Fig. 41. Croquis de maquetas de aviones de Frei Otto, de la serie "pluma de faisán". Fuente: WILHELM, Karin, et al.: *Portrait Frei Otto*. p. 150.

Fig. 42. Croquis de fuselaje formando cáscara de celosía diseñado por Frei Otto. Fuente: WILHELM, Karin, et al.: *Portrait Frei Otto*. p. 136.

dente que nos ayudaría a entender por un lado la riqueza de posibilidades nuevas que aparecen en sus sistematizaciones de las formas y de las estructuras, con un planteamiento globalizador que incluye no sólo los objetos creados por el hombre, sino también los objetos de la naturaleza, tanto animada como inanimada, buscando principios comunes.

Esta capacidad de relacionar y combinar elementos de distintos ámbitos de pensamiento explicaría la inclusión, en sus sistematizaciones de las estructuras, de sistemas no convencionales, como por ejemplo los sistemas inmateriales basados en campos magnéticos o los sistemas materiales sin forma estable, como los líquidos, los gaseosos, los viscosos o los plásticos, lo que hace que estas sistematizaciones no sean esquemas rígidos que coarten la creatividad, sino más bien una base de partida rica en sugerencias para imaginar nuevas posibilidades.

Por otro lado esta capacidad de relacionar y combinar también nos ayudaría a entender la pluralidad de adiciones, combinaciones y variaciones que aparecen en sus exploraciones gráficas de nuevos sistemas estructurales²⁷.

La tendencia a inventar se une a un entusiasmo por el vuelo sin motor y por la construcción de maquetas, que viene estimulado, entre otros, por su profesor de Geografía, el señor Bachmann, hacia 1936²⁸. La observación del vuelo lento y majestuoso

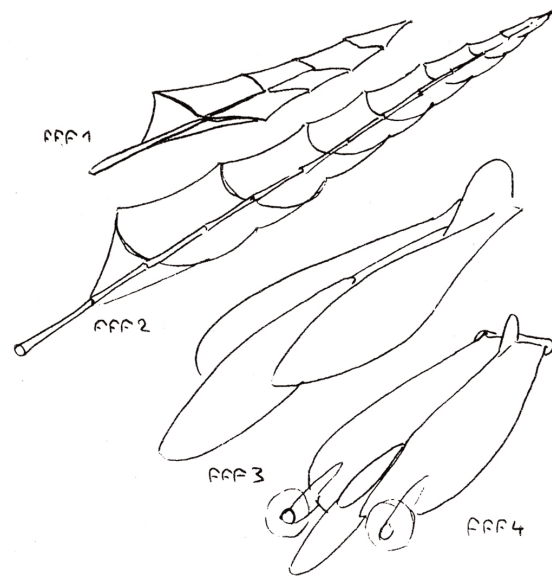
²⁷ Ver el Capítulo VI del presente trabajo, dedicado a la catalogación de nuevos tipos estructurales, en particular los croquis exploratorios de las estructuras de redes y las bóvedas de celosía.

²⁸ Ver las notas autobiográficas de Frei Otto en el capítulo titulado *Fliegen*, de la obra WILHELM, Karin, et al.: *Portrait Frei Otto*. Quadriga-Verlag Severin. Berlín, 1985. Pág. 150.

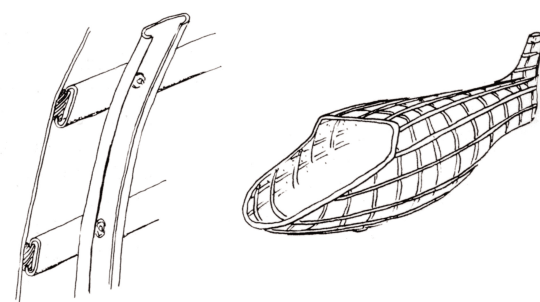
de una de las plumas de un faisán que le regalan a su padre le lleva a construir una serie de maquetas de aviones tomando la pluma de faisán como modelo (fig. 41). Entre 1939 y 1942, ya en el instituto de enseñanza secundaria *Schadow* de Berlín, con el grupo de trabajo de Aerodinámica, y el profesor de Física, Dr. Pohlmeier, surgen nuevas maquetas de aviones con distintos tipos de alas. Entre 1943 y 1944 diseña Frei Otto el fuselaje de un avión monoplaza formado por unos perfiles delgados de aluminio que curvados, remachados y revestidos con una membrana de tela forman una cáscara de celosía (fig. 42). Con ello experimenta cómo los listones que inicialmente eran delgados y flexibles, una vez curvados y revestidos forman una estructura muy resistente y ligera. Su intención no era inventar una nueva forma de construir con cáscaras de celosía, sino fabricar un buen fuselaje aerodinámico con medios económicos²⁹.

Vemos pues como en estos trabajos están ya muy presentes principios y temas, como la búsqueda de la máxima ligereza, la economía de medios, o las bóvedas de celosía, que se desarrollarán y serán un hilo conductor en la trayectoria posterior de Frei Otto.

Otro momento importante en esta trayectoria en la que se van desarrollando y afianzando estos principios y temas fue la experiencia como arquitecto e ingeniero en el campo de prisioneros de guerra *Dépôt 501* en Le Coudray, cerca de Chartres, en Francia, entre 1945 y 1947. Una situación de gran precariedad de medios materiales,



41
42

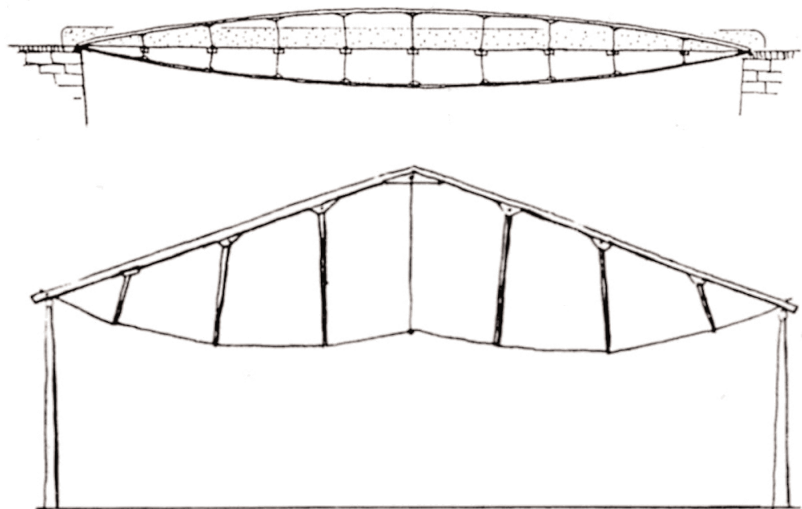


²⁹ Ver las notas autobiográficas de Frei Otto en el capítulo titulado *Kuppeln und Schalen*, de la obra WILHELM, Karin, et al.: *Portrait Frei Otto*. Quadriga-Verlag Severin. Berlín, 1985. Pág. 136.

Fig. 43. Croquis de vigas diseñadas por Frei Otto. Fuente: OTTO, Frei: *Prinzip Leichtbau*. (IL 24). Pág. 7.

con muchas horas para pensar y experimentar. Había que reconstruir puentes y naves industriales. Para la reconstrucción del puente sobre el río Eure sólo se disponía de viejas vías de ferrocarril. Los ingenieros del grupo de planificación habían diseñado una viga de celosía de cordones paralelos, un tipo de viga ya utilizado anteriormente en innumerables ocasiones, que a Frei Otto le pareció que requería demasiado material y que no podía ser una forma óptima³⁰. Con ayuda de simples diagramas de fuerzas desarrolló un método para optimizar vigas de celosía biapoyadas uniformemente cargadas. La forma, relata Frei Otto, no estaba pre-determinada, sino que fue surgiendo casi por sí sola a partir del diagrama de fuerzas. Así cristalizó la forma de una viga lenticular o de Laves (fig. 43 arriba), sin haber tenido todavía conocimiento de los trabajos de este ingeniero alemán, en la que se combinan un cordón superior curvado comprimido y un cordón inferior de curvatura inversa traccionado, ambos con solicitaciones de magnitud similar en el estado de carga máxima. Se aúnan así el

43



³⁰ Ver OTTO, Frei : *Prinzip Leichtbau / Lightweight Principle*. Krämer. Stuttgart, 1998. (IL 24). Pág. 7.

principio del puente en arco y el del puente colgante, de manera que en los apoyos no hay ni empujes exteriores ni tracciones hacia el interior.

Las investigaciones en el campo de prisioneros prosiguieron con cerchas para naves, y en este caso también, llegó a saber después que Maillart había construido una celosía muy parecida en hormigón armado (Fig. 43. abajo.). Había un objetivo común en todas estas investigaciones, que venía ya impuesto, en parte, por la precariedad material de la situación, y que sería otro hilo conductor de sus trabajos e investigaciones posteriores: el empleo de la mínima cantidad de material y la optimización de la forma resistente.

Este objetivo lo expresó elocuentemente Frei Otto en alguno de sus escritos posteriores³¹: *“La forma de muchas estructuras, como por ejemplo torres, puentes y cubiertas, para las que el material de construcción se utiliza de modo óptimo, es desconocida. Después de intensas investigaciones tuvimos que llegar a la conclusión de que todavía no se conoce ni siquiera la forma de un simple soporte sometido a compresión con el mínimo empleo posible de material, y menos todavía la de vigas o jácenas sometidas a flexión”*. Refleja un convencimiento que ya detectamos en la trayectoria de los ingenieros más innovadores en la creación de formas resistentes con los nuevos materiales del siglo XX: el de que lo resistente tiene la necesidad de ser desvelado formalmente.

³¹ Ver el prólogo de OTTO, Frei; SCHAUR, Eda, et al.: *Grundlagen / Basics*. Krämer. Stuttgart, 1979. (IL 21).Pág. 4. La traducción es propia.

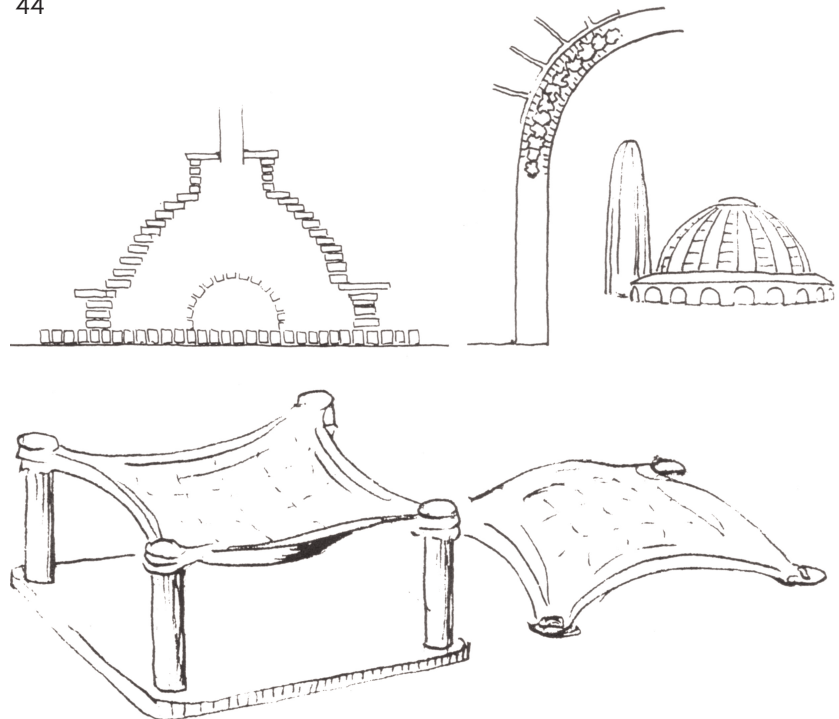
Fig. 44. Croquis de bóvedas y ensayos con maquetas colgantes ideadas por Frei Otto. Fuente: WILHELM, Karin, et al.: *Portrait Frei Otto*. p. 136.

Fig. 45. Frei Otto explicando su maqueta de arco multiarticulado en su taller estudio de Warmbronn. Fuente: Foto del autor P6070004.

Como consecuencia lógica de este objetivo de la optimización de la forma resistente y del empleo de la mínima cantidad de material, se va planteando el principio de la forma antifunicular con otros experimentos que encontramos también en la experiencia del campo de prisioneros de guerra como antecedentes de las investigaciones posteriores sobre las bóvedas de celosía. Así empezó a llevar a cabo ensayos con maquetas colgantes de tela empapada de yeso, que se dejaban endurecer y que eran posteriormente invertidas (fig. 44 abajo). Era una experiencia que Frei Otto ya había conocido en el taller de su padre, mientras que por otro lado todavía no conocía nada de Gaudí³².

Por otra parte su formación como cantero ya le había llevado a investigar las propiedades portantes de las bóvedas construyendo en el campo de pri-

44



³² Ver las notas autobiográficas de Frei Otto en el capítulo titulado *Kuppeln und Schalen*, de la obra WILHELM, Karin, et al.: *Portrait Frei Otto*. Quadriga-Verlag Severin. Berlín, 1985. Pág. 137.

sioneros varias de ellas, con piedras y con ladrillos, unas para hornos de leña en la panadería y otra para una estufa en la cantina (fig. 44 s. i.). La visión permanente de la catedral de Chartres cerca del campo de prisioneros tampoco podía dejar de estimular y ejercer su influencia en una mente con unas dotes de observación e invención tan extraordinarias. Así surgió también un esbozo de iglesia con una "cúpula radial" (fig. 44 s. d.) con franjas acristaladas entre los radios de la cúpula, y un campanario también abovedado y redondeado³³.



45

Durante sus estudios de arquitectura en la Universidad Técnica de Berlín prosiguieron las investigaciones sobre las bóvedas y las formas antifuniculares, y así, entre 1950 y 1951 construyó Frei Otto la maqueta de un "arco multiarticulado" (fig. 45), es decir, con dovelas articuladas, para hacer visible la línea de presiones de un arco trabajando sólo a compresión. Quedaba así en entredicho la afirmación de su profesor de estructuras y futuro director de su tesis, el profesor Bickenbach: "Un arco triarticulado es estable, uno cuatriarticulado ya no lo es, se hunde". La maqueta demostraba que un arco con muchas articulaciones también es estable, si las articulaciones tienen un gran radio de curvatura. La observación de las bóvedas de ladrillo con muchas juntas "débiles" y grandes deformaciones, que entre las ruinas habían resistido a las bombas, fue, según Frei Otto, el punto de partida para la construcción de esta ingeniosa maqueta³⁴.

Los programas de intercambio auspiciados por las potencias vencedoras occidentales le permiten a Frei Otto en 1950, durante el curso de sus estu-

³³ *Ibidem*. Pág. 136.

³⁴ *Ibidem*. Pág. 137.

Fig. 46. Arenas de Raleigh.
Fuente: WILHELM, K., et al.:
Portrait Frei Otto. pág. 19. OTTO,
F.: Tensile structures II. pág. 56
fig. 2.

dios de arquitectura, disfrutar de una beca para una estancia de varios meses en los Estados Unidos de América. Frei Otto aprovecha la ocasión para visitar a importantes protagonistas de la arquitectura moderna que residen allí: Wright, Mendelsohn, Saarinen, Mies van der Rohe...³⁵.

Por recomendación de Gropius visita a Saarinen, quien a la vista de sus áreas de interés le dirige hacia el estudio del ingeniero Fred N. Severud. Allí conoce Frei Otto los dibujos de Matthew Nowicki, que poco antes había fallecido, para las arenas de Raleigh, un proyecto que va a tener una gran trascendencia en su trayectoria posterior, como estímulo para la investigación sistemática de las cubiertas colgantes y las estructuras traccionadas³⁶. Este es, en efecto, el tema que él asumirá para desarrollar en su tesis doctoral, aunque la fascinación que sobre el mundo de las cúpulas y los abovedamientos ejercían los experimentos con formas antifuniculares, como la maqueta del arco multiarticulado, casi le lleva a escribir la tesis sobre las bóvedas, y así lo hubiera hecho – afirma Frei Otto³⁷ – si no hubiera conocido las arenas de Raleigh.

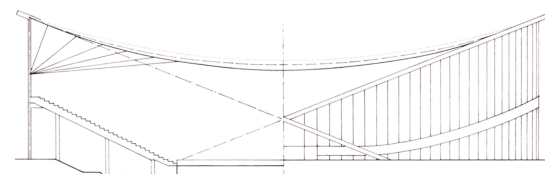
Esta obra representa una de las primeras experiencias significativas en el campo de las cubiertas de redes de cables de grandes luces. La red de cables forma una superficie de doble curva-

³⁵ De estos encuentros da cuenta en tres artículos publicados entre 1951 y 1952 en diferentes revistas alemanas. Ver la bibliografía de artículos publicada en ROLAND, C. *Frei Otto: estructuras*. 1973 (1965) pág. 167. Los artículos también están recogidos en OTTO, F.: *Schriften und Reden. 1951-1983*. 1984. Pág. 4-11.

³⁶ Ver OTTO, F. (ed.): *Tensile structures II*. MIT Press. Cambridge, USA, 1969 (1966) pág. 56.

³⁷ Ver las notas autobiográficas de Frei Otto en el capítulo titulado *Kuppeln und Schalen*, de la obra WILHELM, Karin, et al.: *Portrait Frei Otto*. Quadriga-Verlag Severin. Berlín, 1985. Pág. 137.

tura anticlástica, una silla de montar, soportada por dos arcos parabólicos de hormigón armado fuertemente inclinados, que a su vez apoyan en una serie de pilares de acero revestidos de hormigón, cubriendo la estructura un espacio con una luz libre, en cada eje principal, de 92 y 97 metros. Aparece, pues, en esta obra una geometría fundamental para la rigidización de las estructuras superficiales traccionadas: las superficies de doble curvatura inversa, que serán frecuentes en las investigaciones y las propuestas de Frei Otto en este campo de las estructuras traccionadas, aunque aquí, en las arenas de Raleigh, todavía sin asumir plenamente el papel rigidizador que le corresponde. En efecto, en el análisis que el propio Frei Otto hace de esta estructura³⁸ no la considera una red de cables pretensada, ni piensa que fuera diseñada como tal, sino más bien como una serie de cables colgados paralelos al eje que une las claves de los arcos, ligeramente pretensados, después de su montaje, por una segunda serie de cables perpendiculares de curvatura inversa. Dado que la primera familia de cables formaba en los arranques un plano tangente al definido por los arcos inclinados, el efecto rigidizador del pretensado era reducido en el entorno de las claves de los arcos, por lo que hubo que disponer en esa zona unos tirantes adicionales en el interior (fig. 46 abajo). Por otro lado, la forma de silla de montar favorecía una adecuada evacuación de las aguas pluviales hacia los puntos de cruce de los arcos.



46

³⁸ Entre 1951 y 1953 Frei Otto publica varios artículos sobre esta obra en diferentes revistas alemanas. Ver la bibliografía de artículos publicada en ROLAND, C. *Frei Otto: estructuras*. Gustavo Gili. Barcelona, 1973 (1965) pág. 167. También analiza esta obra en *Cubiertas colgantes* pág. 91-97, y en *Tensile structures II* pág. 56-57.

El tema de su tesis doctoral, las cubiertas colgantes, cuya elección, tal como indicábamos, fue motivada y estimulada por el descubrimiento del proyecto de las Arenas de Raleigh, constituía un campo entonces apenas explorado del que existían escasos precedentes tanto en estudios como en realizaciones. La tesis fue presentada en 1953 y publicada en 1954. En su desarrollo aparecen algunos principios y formas estructurales que serían objeto de investigaciones posteriores, basados en ensayos y maquetas experimentales y en estudios teóricos que planteaban una cierta sistematización.

Así aparece ya formulado el concepto de "*natürliches Tragwerk*" (Estructura natural) como "la forma de una estructura que, con la menor cantidad de material, transporta los esfuerzos que recibe a los puntos de reacción o de apoyo"³⁹. Se trata de un concepto que nos remite al principio de la construcción ligera o de optimización de la forma resistente como objetivo o hipótesis fundamental, de manera que las carpas, redes de cables o cubiertas colgadas no cobran una importancia o un interés por sí mismas, sino en tanto en cuanto son medio para alcanzar el objetivo anterior. Como trasfondo encontramos la idea o el convencimiento de que "para cada caso existe sólo una solución estática que resuelva las posibles solicitaciones del modo más sencillo y al mismo tiempo cumpla con las exigencias arquitectónicas"⁴⁰, de manera que "tales estructuras no son resultado de un proceso arbitrario, pues tienen en sí algo de necesario y único"⁴¹.

³⁹ OTTO, Frei: *Cubiertas colgantes*. Labor. Barcelona, 1958 (1954) pág. 88.

⁴⁰ *Ibidem*, pág. 13.

⁴¹ *Ibidem*, pág. 88.

Los tipos estructurales que en concreto aborda la tesis son las membranas y redes de cables – colgadas y pretensadas – las redes colgadas de cables y vigas, las cubiertas colgantes planas, y los arcos, que por el principio de la inversión de las formas anti-funiculares aparecen como tipología afín a las cubiertas colgantes.

Con relación a los citados tipos estructurales aparecen en la tesis formas resistentes como las superficies alabeadas tetrapuntuales, las superficies entibadas con protuberancias redondeadas, las superficies onduladas con crestas y valles alternados o las superficies soportadas y tensadas por arcos (fig. 47).

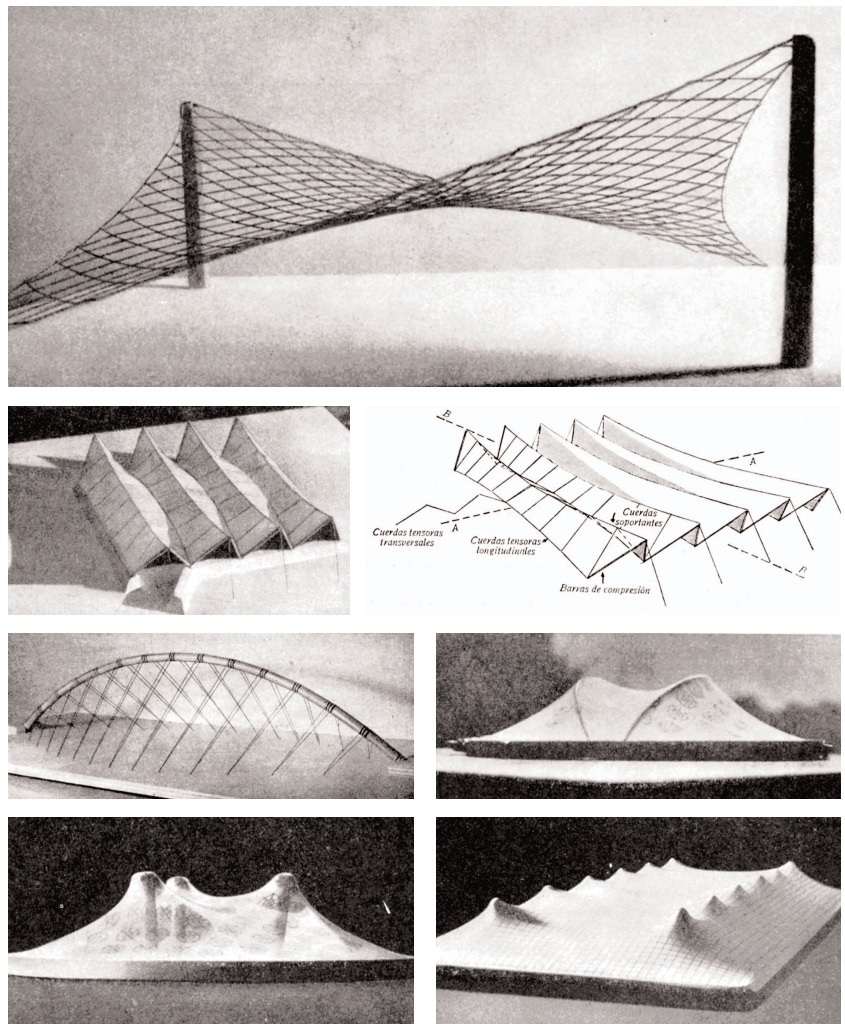
Tipos y formas estructurales son analizados y presentados como consecuencia de estudios realizados con ensayos y maquetas construidas con materiales como redes, tejidos o láminas de goma o caucho. Se analizan formas, tensiones y deformaciones con distintos tipos de bordes, apoyos o formas de reticulado, llegando a realizar ensayos ópticos y aerodinámicos.

A través de todas estas propuestas y de la documentación recogida y presentada en la tesis acerca de los escasos precedentes construidos de cubiertas colgantes se van perfilando unos criterios de ordenación que hacen traslucir en el conjunto de la tesis un intento de sistematización de estos nuevos tipos estructurales en el que no están exentas nuevas posibilidades como las redes de cables para viviendas o las macrocubiertas o grandes envolventes. En este afán de ordenación se lleva a cabo también una exploración sistemática de diferentes combina-

ciones y variaciones de los nuevos tipos, de tal manera que entre la experimentación y la sistematización podemos encontrar los estímulos que van haciendo surgir nuevas posibilidades (fig. 48).

Finalmente no podemos dejar de mencionar, con referencia a los antecedentes experimentales y metodológicos en la formación de Frei Otto, la estrecha colaboración con el empresario Peter Stromeyer, de L. Stromeyer & Co., la mayor fábrica de tiendas y carpas de Alemania a mediados de la década de los 50 del siglo XX, ubicada en Constanza. Con ocasión de la elaboración de la tesis, considerando incluidas

47

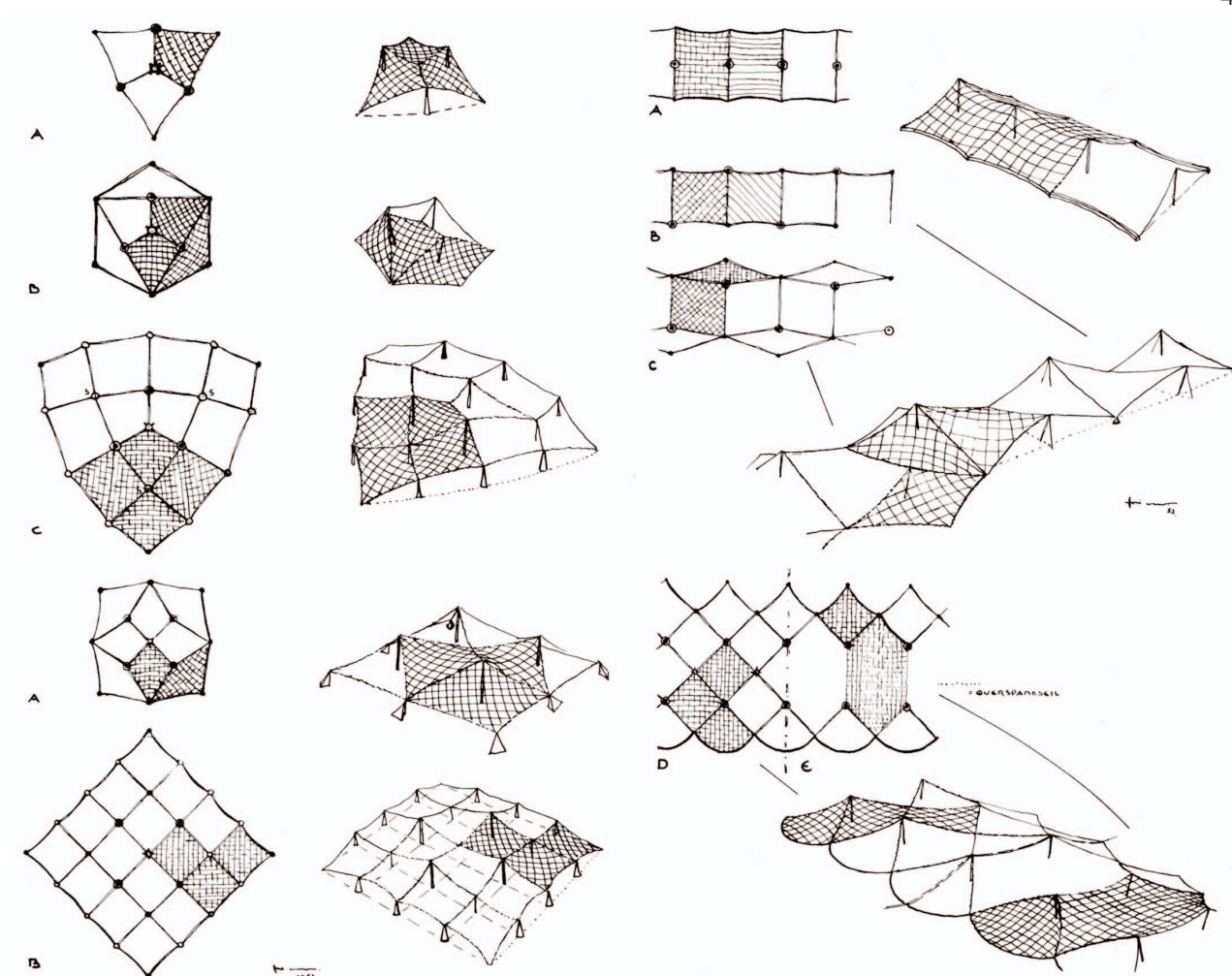


las tiendas y carpas en la definición de cubiertas colgadas que en ella planteaba, Frei Otto escribió a diferentes empresas con el objetivo de recabar documentación y literatura sobre el tema. Sólo respondió L. Stromeyer & Co., diciendo que no había literatura e invitándole a visitarles⁴². Se inició así una estrecha amistad y colaboración con Peter Stromeyer, que le proporcionó a Frei Otto, a partir de 1954, la posibilidad de desarrollar y construir algunas de las propuestas planteadas en su tesis, junto a nuevos prototipos, que dieron lugar a nuevos tipos de tiendas y carpas, como la carpa tetrapuntual de

Fig. 47. Tipos y formas estructurales presentados y analizados en la tesis doctoral de Frei Otto. Fuente: OTTO, F.: *Cubiertas colgantes*. Pág. 109 (fig. 268). Pág. 124 (fig. 301). Pág. 52 (fig. 145). Pág. 163 (fig. 409). Pág. 19 (fig. 32 y 26). Pág. 20 (fig. 34).

Fig. 48. Combinaciones y variaciones de redes de cables con apoyos interiores propuestas en la tesis doctoral de Frei Otto. Fuente: OTTO, F.: *Cubiertas colgantes*. Pág. 56 fig. 163, 164 y 165.

48



⁴² Ver las notas autobiográficas de Frei Otto en el capítulo titulado *Peter Stromeyer*, de la obra WILHELM, Karin, et al.: *Portrait Frei Otto*. Quadriga-Verlag Severin. Berlín, 1985. Pág. 142.

doble curvatura anticlástica, las carpas onduladas con crestas y valles alternados, las carpas soportadas y tensadas por arcos interiores, las carpas entibadas o las carpas de doble inversión con protuberancias y depresiones redondeadas. También las primeras propuestas de cubiertas con membranas plegables fueron propiciadas por esta colaboración.

Las obras y proyectos que dieron ocasión al desarrollo y construcción de estas nuevas tipologías⁴³ fueron fundamentalmente pabellones para exposiciones de jardinería, como la de Kassel en 1955, la de Colonia en 1957 o la de Hamburgo en 1963, así como para la exposición *Interbau* de Berlín en 1957. También se extendió esta colaboración a obras con redes de cables, como la exposición nacional suiza de 1964 en Lausana, o la exposición universal de 1967 en Montreal.

Una consecuencia importante de la colaboración de Frei Otto con Peter Stromeyer fue la aparición de un nuevo enfoque en la tradición de la construcción de tiendas, derivado de la aplicación del método científico y de la experiencia de los ingenieros, sobre todo en la construcción de puentes y cubiertas colgantes. Un enfoque que posibilitaba el paso de la consideración tradicional de las tiendas como construcciones pequeñas y poco duraderas a las estructuras de membranas y redes de cables como nuevo tipo estructural capaz de dar consistencia a construcciones ligeras, duraderas y de grandes luces cuya forma de trabajo fundamental es la tracción. Las posibilida-

⁴³ Ver los capítulos dedicados a estas tipologías en ROLAND, C.: *Frei Otto: estructuras*. Gustavo Gili. Barcelona, 1973 (1965).

des descubiertas y desarrolladas a través de esta colaboración estimularían la investigación de las estructuras traccionadas y la exploración sistemática de sus potencialidades.

Conviene pues resaltar la importancia del apoyo y el papel que la empresa Stromeyer ejerció para el desarrollo de las ideas de Frei Otto, con el conocimiento físico e inmediato de los materiales, con la experiencia de sus oficios, con la visión del empresario, que podríamos comparar, estableciendo un paralelo, con el papel desempeñado por las empresas de construcción "Cubiertas Ala" en la trayectoria de Félix Candela, o la empresa "Ingenieros Nervi y Bartoli" en la de Pier Luigi Nervi, en este caso ambas fundadas por ellos mismos, para la realización de sus innovadores proyectos.

III.4. Antecedentes del “*Institut für leichte Flächen- tragwerke*” (IL, Instituto de Estructuras Ligeras) de Stuttgart.

El Instituto de Estructuras Ligeras lo funda Frei Otto en 1964 en la Universidad de Stuttgart, a petición de Fritz Leonhardt, catedrático y rector de aquella universidad, que lo llama, le ofrece una plaza de profesor y le prepara el camino para la fundación del citado instituto. Los términos en los que estaba planteado este nuevo instituto supusieron para Frei Otto la posibilidad de proseguir una tarea de investigación ya iniciada años atrás, con unos frutos ya alcanzados, en condiciones mucho más favorables, con más estabilidad y mejores medios, y sin las penurias económicas que le acompañaron en su etapa anterior.

Se trata por tanto de la consolidación, en una estructura más permanente y estable, de una trayectoria anterior, que, después de sus antecedentes formativos personales, se fue realizando a través de equipos y grupos de trabajo concretos, y que por tanto se podrían considerar como antecedentes o experiencias preparatorias, previas a la fundación del instituto. Dos grupos aparecen así claramente definidos, cuyos orígenes, objetivos y realizaciones vamos a intentar sintetizar en este apartado: el “*Entwicklungsstätte für den Leichtbau*” (Centro para el desarrollo de la construcción ligera) de Berlín, fundado en 1957, y el grupo de investigación “*Biologie und Bauen*” (Biología y Construcción), fundado en 1961.

III.4.1. El “*Entwicklungsstätte für den Leichtbau*” (EL, Centro para el desarrollo de la construcción ligera) de Berlín.

Después de las experiencias recogidas en el viaje realizado a los Estados Unidos entre 1950 y 1951, de los ensayos y experimentos que condujeron a la tesis doctoral de 1953, y del inicio de la colaboración con Stromeyer, que dio lugar al desarrollo y construcción de nuevos tipos de tiendas y carpas entre 1954 y 1957, Frei Otto funda en Berlín en 1957 el “*Entwicklungsstätte für den Leichtbau*” (Centro para el desarrollo de la construcción ligera; abreviadamente EL) con el propósito de dar continuidad a estos estudios teóricos, experimentos e investigaciones sistemáticas sobre la construcción ligera.

Entre 1957 y 1964, año de fundación en Stuttgart del “*Institut für leichte Flächentragwerke*” (IL, Instituto de Estructuras Ligeras), que supuso la continuación natural del EL, Frei Otto tuvo una intensa actividad docente en diferentes universidades de los Estados Unidos⁴⁴ impartiendo cursos y seminarios sobre estructuras ligeras en los que había un alto grado de experimentalidad. En ellos Frei Otto junto con los participantes de los seminarios exploraban nuevos tipos estructurales mediante la construcción de maquetas experimentales (fig. 49). Estas investigaciones formaban un conjunto indisoluble con los trabajos que se realizaban en el EL, de manera que algunos⁴⁵ de los participantes de estos seminarios eran también colaboradores del EL.

⁴⁴ Ver Biografía de Frei Otto.

⁴⁵ Por ejemplo John Koch (St. Louis), Fred D. Miles (Urbana) o Larry Medlin (Berkeley).



49

50



Muchos de los estudios y proyectos que se realizaron en el EL se publicaron en una serie de nueve informes, denominada *Mitteilungen der E.L.*⁴⁶, que fueron apareciendo entre 1958 y 1963. También se realizaron en este centro muchos de los ensayos y trabajos que condujeron a la publicación de la obra titulada “*Zugbeanspruchte Konstruktionen*” (Estructuras traccionadas), editada en dos volúmenes, el primero dedicado principalmente a las estructuras neumáticas y publicado en 1962, y el segundo dedicado fundamentalmente a las estructuras de membranas y redes de cables, y publicado en 1966.

Dado el carácter totalmente privado de la fundación de este centro, cuya existencia se debió únicamente al empeño e ilusión que Frei Otto puso en él, todos los ingresos que se conseguían con los proyectos, los informes y las publicaciones se destinaban a financiar nuevas investigaciones, a la adquisición de nuevos instrumentos de medida y de material fotográfico, así como a la creación de un importante archivo gráfico⁴⁷, que fue el origen del rico y extenso archivo actual del IL. En 1959 se construyó en Berlín (Zehlendorf) una nave ampliamente acristalada donde tuvieron sede todas las actividades del centro (fig. 50).

Las investigaciones venían motivadas en parte por la necesidad de encontrar la forma más adecuada de estructuras muy ligeras con el máximo ahorro de material, tales como las carpas o las estructuras neumáticas, es decir tenían inicialmente

⁴⁶ Ver apartado IX.4 del capítulo IX Bibliografía.

⁴⁷ Ver ROLAND, C., op. cit. pág. 1.

un carácter aplicado, con una finalidad práctica concreta. Pero pronto se obtuvieron resultados que no sólo eran útiles para responder a determinadas exigencias, sino que además tenían una validez general. De este modo dio comienzo una investigación básica que condujo a Frei Otto y sus colaboradores a otras disciplinas como la Biología, las Matemáticas, la Física y la Geodesia⁴⁸.

Así por ejemplo ocurrió con las investigaciones con películas de jabón. La experiencia que proporcionó la construcción de carpas entre 1954 y 1957 hizo que se procurara en los diseños posteriores evitar carpas cuyas membranas pudieran tener tensiones muy desiguales, y buscar para ellas formas que fueran superficies mínimas, con tensiones iguales⁴⁹. De esta manera a partir de 1958 comenzaron Frei Otto y sus colaboradores a investigar intensivamente con maquetas de películas de jabón. Pero también entre 1958 y 1965 se llevaron a cabo muchos experimentos con películas de jabón que correspondían más bien a un tipo de investigación básica, sin pensar en construcciones que tuvieran que realizarse⁵⁰. Y así se abordaron cuestiones como los caminos mínimos, un problema que ya se había planteado en el campo de las Matemáticas – el problema de Steiner – que propició contactos con especialistas en este campo, como Stefan Hildebrandt, y el diseño y construcción de un aparato específico⁵¹.

Fig. 49. Estructuras experimentales en el seminario sobre estructuras ligeras dirigido por Frei Otto en 1958 en St. Louis (USA). Fuente: Archivo gráfico del IL. Diapositiva 1.11.1

Fig. 50. Nave del Entwicklungsstätte für den Leichtbau construida en 1959 en Berlín. Vista exterior e interior. Fuente: Archivo gráfico del IL. Diapositivas 1.11.75 y 1.11.79

⁴⁸ Ver Introducción en OTTO, F. et al.: *Seifenblasen / Forming bubbles*. Krämer. Stuttgart, 1988. (IL 18). Pág. 10.

⁴⁹ *Ibidem*, pág. 15. Ver también OTTO, F. (ed.): *Tensile Structures II*. MIT Press. Pág. 49-50.

⁵⁰ Ver Introducción en OTTO, F. et al.: *Seifenblasen / Forming bubbles.*, pág. 17.

⁵¹ Ver los capítulos "Theorie" y "Geräte", en op. cit. págs. 306-331.

Los estudios, proyectos y realizaciones que se llevaron a cabo en el EL están ampliamente documentados, como ya hemos indicado, en los nueve informes "*Mitteilungen der E.L.*" y en la obra *Zugbeanspruchte Konstruktionen*, pero también fueron recogidos en una espléndida y primorosa síntesis realizada por uno de los colaboradores del centro – Conrad Roland – que se publicó en alemán en 1965, y en castellano en 1973⁵². Remitimos pues a esta obra para una más amplia información sobre los trabajos del EL. Tan solo enumeraremos aquí de manera esquemática los estudios e investigaciones más destacados.

- Ensayos con películas de jabón.
 - Superficies mínimas. Formas de referencia para estructuras de redes de cables o membranas con tensiones uniformes.
 - Caminos mínimos.
- Cáscaras o bóvedas de celosía por inversión de maquetas funiculares. Construcciones experimentales.
- Arquitectura adaptable. Estudios sobre la composición familiar, crecimiento, variaciones, viviendas desarrollables. Métodos constructivos, distribuciones, urbanismo.
- Estructuras neumáticas, ensayos con maquetas.
 - Ensayos con burbujas de jabón.
 - Estructuras cupuliformes, cilíndricas, cónicas, tóricas, elipsoidales o fusiformes.
 - Estructuras cojín.
 - Estructuras neumáticas reforzadas con cables o redes de cables.
 - Estructuras neumáticas con anclajes interiores

⁵² ROLAND, C.: *Frei Otto: estructuras*. Gustavo Gili. Barcelona, 1973.

para cubiertas de grandes dimensiones.

- Depósitos, silos, tanques, presas.
- Mediciones de maquetas de cubiertas de doble inversión.
- Estructuras arborescentes.
- Edificios suspendidos.
- Estructuras espaciales de barras de nudos rígidos.
- Mástil o brazo móvil articulado.
- Estructuras de redes espaciales de cables pretensados.
- Cubiertas plegables.
- Maqueta de carpa apuntada con cables superiores de suspensión en forma de lazo. Cubierta de red o membrana de doble inversión con apoyos apuntados y cables en forma de lazo.

III.4.2. El grupo de investigación “*Biologie und Bauen*” (Biología y Construcción).

La formación y el desarrollo de este grupo de investigación son un punto de partida y un exponente claro del enfoque interdisciplinar y de la importancia que Frei Otto ha concedido a la investigación en la arquitectura, experimentando la necesidad de salvar la división artificial entre artes y ciencias.

El grupo se fundó en 1961 con ocasión de un seminario que dio Frei Otto en la Universidad Técnica de Berlín sobre las estructuras en la naturaleza y en la técnica, al confluir con las áreas que eran objeto de interés del biólogo Johann Gerhard Helmcke, profesor de la misma universidad, que investigaba los procesos físico-técnicos de formación de estructuras de la naturaleza como las cáscaras de las diatomeas⁵³. Se produce con este grupo la conexión con científicos como los biólogos que se habían planteado los principios de la construcción ligera en la naturaleza, y constituye al mismo tiempo una muestra evidente de la visión globalizadora de la arquitectura de Frei Otto, por un lado inserta en el conjunto de los saberes de las ciencias y las artes, rompiendo así el prejuicio de la autonomía de la disciplina arquitectónica, y por otro lado en consonancia y no en violenta oposición a los procesos de la propia naturaleza.

⁵³ Ver el artículo de Frei Otto en colaboración con J. G. Helmcke: “*Lebende und technische Konstruktionen. Bemerkungen zu Schalen und Raumtragwerken in Natur und Technik*”, publicado en 1962 en la revista *Deutsche Bauzeitung* n° 11, pág. 855-861, posteriormente (1963) traducido al francés con el título “*Structures vivantes et structures techniques*” en la revista *L'architecture d'aujourd'hui* n° 108 pág. 78-84.

Los trabajos del grupo de investigación prosiguieron y se intensificaron con la fundación en 1964 del Instituto de Estructuras Ligeras en Stuttgart, y posteriormente con los programas de investigación SFB 64 (Estructuras de grandes luces) y SFB 230 (Estructuras naturales), auspiciados por el gobierno alemán. Una muestra actual del interés de Frei Otto por las ciencias de la naturaleza y la biología es su próxima publicación titulada "La red en la naturaleza viva", o "La red en los seres vivos"⁵⁴, en la que analiza las aportaciones de biólogos alemanes como Ulrich Kull, Adolf Seilacher y Johann Gerhard Helmcke, estos dos últimos miembros del grupo "*Biologie und Bauen*".

Con el objeto de mostrar la visión del propio Frei Otto sobre el origen, los objetivos y la filosofía de este grupo de investigación presentamos a continuación algunos extractos del texto titulado "*Die Forschungsgruppe Biologie und Bauen*" (El grupo de investigación "*Biologie und Bauen*"), publicado en la recopilación de escritos y discursos de Frei Otto titulada "*Frei Otto. Schriften und Reden: 1951-1983*"⁵⁵.

"El grupo de trabajo alemán "Biologie und Bauen" ocupa un lugar singular en el panorama internacional de la investigación. En él colaboran importantes biólogos, arquitectos e ingenieros [...]. El grupo se fundó en 1961 con el objetivo de alcanzar una mejor comprensión recíproca entre biología, técnica y arquitectura. Los métodos científicos hasta entonces adoptados eran unilaterales e insuficientes, limitándose a analogías banales. Antes se decía a menu-

⁵⁴ Ver transcripción de la conversación mantenida con Frei Otto el 7 de junio de 2004.

⁵⁵ BURKHARDT, Berthold (ed.): *Frei Otto. Schriften und Reden: 1951-1983*. Vieweg, Braunschweig, 1984. Pág. 170-173. La traducción del alemán es propia.

do que los modelos de la naturaleza habían inspirado a los arquitectos del pasado. El grupo ha demostrado que hasta ahora la técnica ha sido en su mayor parte antagonista de la naturaleza: temiendo las fuerzas naturales, el hombre buscó protegerse con construcciones, con la arquitectura. Se defendió tan violentamente que parte de la naturaleza quedó destruida.

En 1961 estaba dando un seminario en Berlín sobre estas cuestiones en el que participaban estudiantes particularmente interesados. Estos me llevaron a Johann Gerhard Helmcke, entonces profesor ordinario de biología y antropología en la Universidad Técnica de Berlín, y director del instituto de cariología y de microbiología en el Instituto Max-Planck. Helmcke era un conocedor de las diatomeas de renombre internacional. Como profesor el papel de Helmcke era el de iniciar a jóvenes ingenieros en la biología. Él intentaba no sólo interpretar esqueletos y conchas, sino también plantearse el problema de cómo se forman tales objetos, de cómo han sido "montados" por la naturaleza. Su interés se refería a los procesos físico-técnicos, que permiten la formación de estas estructuras. Él descubrió pronto que la técnica de la construcción ligera, sobre todo en el campo de la arquitectura y de la ingeniería aeronáutica, tiene en cuenta tales procesos. Esto es válido sobre todo para estructuras laminares de grandes luces y para estructuras de celosía, que en relación pueden ser todavía mucho más ligeras que las más ligeras estructuras aeronáuticas. [...]

Helmcke y yo decidimos recopilar todos los conocimientos existentes en el campo de la construcción ligera, de la biología y de la arquitectura y dimos conferencias conjuntamente. Tras la creación

del Instituto de Estructuras Ligeras en la Universidad de Stuttgart en el año 1964, se intensificó la cooperación del grupo. En la investigación sobre la construcción ligera interesa cualquier tipo de construcción, independientemente de si procede del campo de la naturaleza inanimada, de la naturaleza animada o de la técnica. Al grupo se unieron pronto el botánico Schill, de Heidelberg, el paleontólogo Seilacher, de Tübingen, zoólogos como Kullmann, de Colonia, y Schäfer, de Frankfurt, con sus colaboradores Gutmann y Bonik, el biofísico Nachtigall así como los etólogos Eibl-Eibesfeld y Schiefenhövel⁵⁶.

Para comprender los objetos de la naturaleza se deben conocer las leyes de su génesis y de sus transformaciones. Basados en nuevos objetivos y en un método original, los resultados no faltaron. En primer lugar se trataba de comprender esencialmente la formación, el crecimiento y la existencia de los objetos de la naturaleza viviente. Ninguno de los miembros del grupo quería observar estos objetos desde el punto de vista del aprovechamiento técnico. Todos eran conscientes de que difícilmente la naturaleza suministra ideas a un inventor o a un técnico privado de ingenio. [...]. La afirmación, bastante difundida pero parcialmente falsa, de que los objetos de la naturaleza viviente son "óptimos", ha causado mucho daño. La tendencia a entender la naturaleza como una invención técnica, a la que se debe sólo preguntar, ha agotado su propio curso. Todos los componentes del grupo reconocían claramente que la naturaleza viviente no se revela a quien la estudia con la

⁵⁶ Para ver una relación más completa de los miembros del grupo, ver OTTO, F. et al.: *Natürliche Konstruktionen*. Deutsche Verlags-Anstalt. Stuttgart, 1982. Pág. 9.

única finalidad de aprovecharla; se manifiesta en cambio a quien indaga las causas y los efectos sin intenciones premeditadas.

Las verdaderas estructuras vivientes son indescriptiblemente complicadas. Los objetos se han ido perfeccionando durante millones de años a través de mutaciones y selecciones. Ningún arquitecto ha podido hasta ahora construir con resultados tan fascinantes, ni siquiera desde el punto de vista estético. Todo el grupo de trabajo se queda fascinado al comprobar que algunas de las más recientes construcciones ligeras desarrolladas totalmente sin ningún modelo previo, presentan notables afinidades con objetos biológicos. Por ejemplo no podemos olvidar cómo en 1962, en el Instituto Max-Planck de Berlín nuestro amigo americano Buckminster Fuller se sintió fascinado por las últimas fotografías estereoscópicas de esqueletos de diatomeas. Él observó aquellas novísimas fotografías en ampliaciones de cinco mil a cincuenta mil veces, que él no podía conocer. Las imágenes estereoscópicas aparecían como maquetas de sus famosas cúpulas. A los componentes del grupo les resultaba claro que si él hubiese conocido antes los esqueletos de las diatomeas, todo el mundo diría que las había copiado de la naturaleza viviente. Pero por otro lado, si hubiera conocido cómo eran realmente los esqueletos de diatomeas, probablemente no se habría atrevido nunca a construir sus cúpulas. [...]

Cuando periodistas superficiales escriben hoy sobre el grupo "Biologie und Bauen", afirman tranquilamente que las tiendas de la Exposición Suiza de Lausana de 1963, el pabellón alemán de Montréal y la sucesiva cubierta olímpica de Munich no son otra

cosa que imitaciones de telarañas. Bien diferente ha sido el camino que ha llevado a estas construcciones. Cuando estas construcciones de la técnica extremadamente ligeras fueron proyectadas, realizadas, calculadas y ensayadas, las telarañas no eran mejor conocidas para los diseñadores que para cualquier profano interesado. Sin embargo, cuando la nueva técnica de las cubiertas de redes de cables hubo alcanzado un cierto nivel de desarrollo, entonces fue posible ver las telarañas con otros ojos, más adiestrados, más capaces de "reconocerlas". De gran ayuda fue la presencia de Ernst Kullmann, director del zoo de Colonia. Después de que los arquitectos de las redes de cables hubieran encontrado en las telarañas lo que habían "inventado" para las construcciones con redes, pidieron a Kullmann que investigara particularmente determinados puntos de las telarañas. Así él fotografió para nuestro grupo los nudos, los puntos de sujeción y otros elementos. Esto llevó a una visión nueva y fundamental. Después de estas experiencias con cáscaras y redes, para todos los componentes del grupo de investigación rige la siguiente regla: si conocemos a fondo la técnica y las condiciones básicas del principio de la construcción ligera, sólo entonces podremos empezar a comprender los objetos de la naturaleza viviente en lo que se refiere a forma y estructura. Las estructuras biológicas no son optimizadas siguiendo criterios de costes. Si quisiéramos copiarlas serían en la mayor parte de los casos enormemente caras. La naturaleza optimiza siguiendo criterios de rendimiento con el mínimo empleo de material.

Era necesario para el grupo encontrar una unidad de medida con la que se pudieran comparar entre sí todos los objetos de la naturaleza, inanimada

y viviente, y de la técnica. Era necesario saber en qué objetos se transmiten fuerzas con más masa, y en cuáles con menos. Indudablemente son ligeros los objetos que transmiten fuerzas con una masa que no se puede imaginar menor, tales como los átomos, pero también las constelaciones y los sistemas solares. Todos los objetos realmente grandes deben tener una construcción relativamente ligera, de otro modo no podrían ser grandes. En la escala de tamaños que van del átomo a todo el Universo, la tierra es sólo un objeto relativamente pequeño, y la naturaleza viviente con una escala de medidas que va de una diez milésima de milímetro a ciento cincuenta metros (los árboles más grandes) a su vez tan solo es una pequeña parte de ella. Fue Andreas Feininger, el famoso fotógrafo de la naturaleza y arquitecto, quien comenzó realmente a medir la capacidad portante de objetos de la naturaleza viviente. Él se construyó los aparatos y sometió a tracción los hilos de las telarañas y otras cosas diversas.

El grupo "Biologie und Bauen" ha llevado a cabo investigaciones sobre el empleo relativo de masa en los objetos más diversos, y ha confirmado que sólo hay unos pocos objetos de la técnica que tengan un empleo de masa inferior a los objetos de la naturaleza viviente. Así el hombre sólo desde hace unos treinta años es capaz de producir fibras más resistentes y más ligeras que el algodón, la seda y la lana. Los soportes, vigas, edificios, naves y aviones hasta ahora realizados emplean por regla general una cantidad de masa sustancialmente mayor que objetos naturales análogos. Por otro lado la naturaleza viviente no está "optimizada" hasta el extremo. Ella dispone de pocos materiales de construcción: proteínas, celulosa, calcio. Los objetos de la naturale-

za viviente están formados de modo muy diverso. Los materiales vienen "dados" más o menos en el marco de los procesos bioquímicos; la forma es lo que es optimizado.

Quien quiere investigar la forma y estructura de los objetos vivientes, debe ocuparse también en especial de aquel sólido elemento constructivo de que está compuesta la naturaleza viviente: la célula, y de sus antecesores todavía no vivientes: las microesferas⁵⁷. No se puede considerar la célula aisladamente; ésta sólo puede existir dentro de determinadas condiciones que vienen dadas por el entorno, por la naturaleza en su conjunto. El descubrimiento más importante es que todos los objetos de la naturaleza viviente tienen sólo un único sistema de montaje y un solo elemento constructivo. Este sistema constructivo, con un núcleo fluido al interior y una membrana envolvente flexible resistente a tracción es válido tanto para las plantas como para los animales y todos los microorganismos. Este esquema varía millones de veces. En arquitectura sería como si sólo existiera un único método de construcción (por ejemplo la construcción con ladrillo), y con este método se construyeran todas las casas, diques, puentes y demás cosas.

Será tarea del grupo en los próximos años examinar e indagar todavía más lo que verdaderamente es ligero en la naturaleza viviente, qué estructuras de la técnica tienen una masa reducida y un gasto de energía escaso. Indudablemente se ha progresado en conocimientos. La arquitectura y la ingeniería por ahora han sido más fecundas para la biología

⁵⁷ Sobre las microesferas véase IL 9 *Pneus in Natur und Technik*. IL. Stuttgart, 1977. Pág. 198-199.

que a la inversa. A menudo se nos pregunta por qué los arquitectos no construyen de un modo tan vinculado a la naturaleza como la propia naturaleza. La respuesta es que si se quiere imitar con superficialidad a la naturaleza, raramente se alcanza el objetivo. Se debe permanecer en el ámbito de las propias posibilidades y conocimientos; sobre todo se debe comprender mejor qué es en el fondo la naturaleza. El objetivo de los pocos arquitectos que hoy intentan construir de modo acorde con la naturaleza, no es construir casas que por ejemplo tengan aspecto de órganos o que se asemejen a cuerpos de animales, es decir, que parezcan naturales, sin serlo en absoluto. Para ser natural un producto del hombre no necesita parecerse a una planta o a un árbol. El objetivo fundamental, que con seguridad no se podrá alcanzar antes del próximo siglo, es que las casas y las ciudades junto con las plantas y los animales formen un biotopo natural, es decir, que la casa no se dirija contra la naturaleza, sino que al contrario el hombre y su técnica sean una parte inseparable de la naturaleza. Si se alcanza este objetivo entonces se podrán aplicar los conocimientos sobre las estructuras naturales a las estructuras de la técnica." [...]

A modo de síntesis de los trabajos del grupo relacionamos a continuación algunas de las actividades más destacadas, por orden cronológico⁵⁸.

- 1964 Primeros estudios sobre empleo de masa de huesos, filamentos de hierba, barras y tubos de madera, aluminio y acero (cálculo del valor del *Bic* bajo solicitaciones uniaxiales de compresión, tracción y flexión).
- 1968 Comparación de estructuras naturales y estructuras de la técnica tomando como ejemplo las cáscaras de diatomeas. Presentación de Helmcke en la Exposición de la Industria Alemana.
- 1971 I. Coloquio interdisciplinar. Tema: "Biología y Construcción". Planteamiento conjunto de toda la disciplina. Documentado en las publicaciones de la serie *Mitteilungen* del IL n^{os} 3, 4 y 6.
- 1972 II. Coloquio interdisciplinar. Tema: "Telarañas y cubiertas de redes de cables". Documentado en la publicación IL 8.
- 1973 III. Coloquio interdisciplinar. Tema: "Estructuras neumáticas en la naturaleza y en la técnica". Documentado en la publicación IL 9. Formulación de la hipótesis de que "Las estructuras neumáticas son el principio fundamental del mundo de las formas de la naturaleza viva".
- 1978 Ensayos con maquetas para generar la forma de estructuras arborescentes mediante fluidos con hilos.
- 1979 Publicación del volumen IL 19 "Estructuras neumáticas crecientes y escindibles".

⁵⁸ Para una relación más completa véase SCHAUR, Eda: "*Biologie und Bauen – Chronologische Entwicklung*", en A.A.V.V.: *Schalen in Natur und Technik. Diatomeen I.* (IL 28) Krämer. Stuttgart, 1985. Pág. 320-321.

- 1979 Simposio internacional sobre la arquitectura natural. Documentado en el volumen IL 27 "Arquitectura natural".
- 1980 Conversaciones de trabajo. Tema: "Estructuras de huesos", "Membranas técnicas y biológicas", "Cáscaras en la naturaleza y en la técnica".
- 1981 Documentos de trabajo sobre el principio estructural de los huevos de pájaros y las alas de insectos (Frei Otto).
- 1982 Preparación del programa de investigación SFB 230 (Estructuras naturales) auspiciado por el gobierno alemán.
Publicación del libro "Estructuras naturales".
- 1983 Documento de trabajo sobre la generación de la forma y la estructura de los objetos vivientes (Frei Otto).
Exposición "Estructuras naturales" en Moscú.
- 1985 Publicación del volumen IL 28 "Diatomeas I. Cáscaras en la naturaleza y en la técnica".

El tema de la relación entre la biología y la construcción o entre la naturaleza y la técnica ha sido uno de los temas claves en las investigaciones realizadas en el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart, desde su fundación en 1964. La mayor parte de las actividades y trabajos realizados por el grupo "*Biologie und Bauen*" entre 1970 y 1985 estuvieron vinculados al programa de investigación SFB 64 (Estructuras de grandes luces), auspiciado por el gobierno alemán. A partir de 1984 y hasta 1995 las actividades y trabajos del grupo quedaron plenamente insertados en el programa de investigación SFB 230 (Estructuras naturales), también auspiciado por el gobierno alemán, por lo que nos remitimos al apartado correspondiente.

III.5. La fundación del “*Institut für leichte Flächentragwerke*” (IL, Instituto de Estructuras Ligeras) de Stuttgart.

Tal como adelantábamos en el apartado anterior, el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart fue creado en 1964 por iniciativa del ingeniero Fritz Leonhardt, catedrático y rector de la Universidad de Stuttgart, que llama a Frei Otto a aquella universidad y prepara las condiciones para que éste pueda proseguir sus investigaciones sobre las estructuras ligeras desde la dirección de un instituto de investigación perteneciente a la universidad y con una estructura estable.

Fritz Leonhardt conocía a Frei Otto desde 1954⁵⁹, cuando éste le presentó su tesis publicada bajo el título de “Cubiertas colgantes”. Leonhardt comprendió que se trataba de un hombre con una gran imaginación e intuición con el que pronto se sintió vinculado por sus propias investigaciones anteriores sobre la construcción ligera. El deseo de colaborar entre ellos se materializó por primera vez en 1957 con ocasión de la exposición federal de jardinería de Colonia, en el proyecto para el arco de entrada⁶⁰, un arco vertical de tubo de acero que soportaba una membrana de tejido y al mismo tiempo era atirantado por ella.

⁵⁹ Véase la introducción de Fritz Leonhardt a la publicación IL 36 *Subjektive Standorte in Baukunst und Naturwissenschaft*. Krämer. Stuttgart, 1984. Pág. 10, y también la transcripción de la conversación mantenida con Frei Otto el 7 de junio de 2004.

⁶⁰ Sobre esta obra véanse los “*Mitteilungen*” (informes) 2 y 3 del “*Entwicklungsstätte für den Leichtbau*” (Centro para el desarrollo de la construcción ligera).

Frei Otto había impartido entre 1958 y 1962 cursos y seminarios en diferentes universidades americanas⁶¹, y había recibido ofertas para continuar su trabajo en los Estados Unidos. Leonhardt hizo todos los esfuerzos para atraerlo a la Universidad de Stuttgart creando entre 1962 y 1964 las condiciones necesarias para la fundación del instituto. Este se constituyó en el marco de la entonces llamada "*Fakultät für Bauwesen*" (Facultad de Construcción), que englobaba y agrupaba a ingenieros, urbanistas y arquitectos enseñando, investigando, discutiendo y propiciando encuentros bajo un mismo techo, en el amplio contexto de la disciplina de la construcción, hasta que en 1968, como consecuencia de la revuelta estudiantil, se escindió en cinco especialidades, perdiendo así el ambiente de diálogo y entendimiento mutuo que hasta entonces se había dado⁶². Habían sido los años florecientes de la llamada segunda escuela de Stuttgart con personajes de la talla de Curt Siegel, Jürgen Joedicke o Rolf Gutbrod.

El instituto comenzó con una estructura organizativa modesta, compuesta por el propio Frei Otto como profesor honorario y director, dos asistentes, una secretaria, un jefe de taller y un estudiante de apoyo. Este equipo se mantuvo en general incrementado en torno a quince o veinte colaboradores⁶³, que le daban al instituto un carácter más operativo y a la vez también más controlable, gracias a apoyos externos como los programas de investigación SFB 64 y 230 auspiciados por el gobierno ale-

⁶¹ Ver biografía.

⁶² Véase sobre esta facultad el texto de Frei Otto titulado "*Natural structures, task for the future*", publicado en el volumen nº 46 *Verzweigungen* de la serie *Konzepte* de la SFB 230, pág. 3 y 4.

⁶³ El número de colaboradores llegó a superar los cien durante los trabajos realizados en el instituto para el parque olímpico de Munich.

mán, y también al de instituciones privadas como la fundación *Volkswagenswerk* o las empresas *Hoechst AG* (Alemania) y *SEIBU* (Japón).

El instituto, como hemos indicado anteriormente, no partió de cero, sino que se desarrolló a partir de los trabajos ya realizados por Frei Otto en el *Entwicklungsstätte für den Leichtbau* por él fundado en Berlín, y también de su experiencia docente en varias universidades americanas. El estrecho contacto con el empresario constructor de carpas de Constanza, Peter Stromeyer, se mantuvo y siguió produciendo frutos que enriquecían los trabajos de investigación.

La actividad⁶⁴ comenzó al término del verano de 1964 con un seminario introductorio dedicado a los principios de la construcción ligera y las relaciones recíprocas entre forma, fuerza y masa, un tema complejo que fue objeto de estudios durante muchos años a pesar del escepticismo de algunos colegas ingenieros. Desde el principio se planteó la docencia para arquitectos e ingenieros en un contexto de estrecha relación y actualidad. Los estudiantes, a partir de una elección libre, no como materia obligatoria, se integraban en las tareas de los programas de investigación del instituto, como por ejemplo el desarrollo de las redes de malla uniforme, los métodos de generación de la forma de redes colgantes y cáscaras invertidas, y también de las estructuras neumáticas y de las conexiones de caminos mínimos. Entre los estudiantes hubieron numerosos becarios extranjeros procedentes de diferentes países cuyo contacto, ya

⁶⁴ Para una breve historia de los primeros veinte años del instituto véase BURKHARDT, B.: "20 Jahre IL", en *IL 36 Subjektive Standorte in Baukunst und Naturwissenschaft*. Krämer. Stuttgart, 1984. Pág. 12-18.

desde sus lugares de origen, ha perdurado en la mayoría de los casos a lo largo del tiempo.

Las investigaciones y los estudios vinculados a ellas tuvieron siempre un planteamiento marcadamente experimental. El desarrollo de una extraordinaria técnica fotográfica y el imaginativo diseño y construcción de sencillos y a la vez precisos aparatos y equipos para los experimentos fueron de gran importancia para las investigaciones. Así surgieron aparatos para formar caminos mínimos, un banco óptico con un aparato para formar superficies mínimas con cámara climatizada y tunel de viento, una mesa de mediciones para la determinación espacial de superficies y cuerpos, así como equipos mecánicos para la medición de esfuerzos y deformaciones, que constituyen algunos ejemplos de estos programas de "autoconstrucción" de aparatos.

La breve fase de desarrollo del instituto quedó repentinamente alterada cuando a mediados de 1965 Rolf Gutbrod y Frei Otto después de un concurso recibieron el encargo de construir el pabellón alemán para la exposición universal de 1967 en Montreal a tan solo año y medio de la fecha prevista para la inauguración. Las maquetas de cubiertas de membrana de doble inversión con apoyos apuntados y cables en forma de lazo construidas por Larry Medlin en el *Entwicklungsstätte für den Leichtbau* en Berlín fueron las precursoras del sistema estructural que se iba a utilizar. Durante un año el equipo del instituto se multiplicó por tres. Para todos los colaboradores el pabellón de Montreal representó una experiencia muy singular, ya que pudieron tomar parte en todas las fases de esta obra, desde el proyecto a la planificación, y desde la producción al montaje. También

se unieron a los arquitectos la oficina de ingeniería de Leonhardt y la empresa de construcción de carpas L. Stromeyer. En el instituto se construyó sobre la mesa de mediciones una maqueta de grandes dimensiones que proporcionó los datos necesarios para el despiece de la red de cables y las membranas, para el estudio de deformaciones y para el montaje. También el desarrollo de los detalles constructivos de las bóvedas de celosía y de la estructura de las plataformas fue realizado en el instituto.

Dos consecuencias de importancia clave tuvo el pabellón de Montreal, una en el ámbito de la investigación, la otra en el ámbito de la praxis. Por un lado contribuyó a que se estableciera en Stuttgart el programa de investigación SFB 64, en el que se profundizó en el estudio de posibilidades de variación y en los medios para alcanzar mayor precisión en la planificación, cálculo y métodos constructivos de estructuras ligeras de grandes luces tales como carpas, redes, bóvedas de celosía y estructuras neumáticas. Por otro lado estimuló al equipo de arquitectos Behnisch & Partner a aplicar el mismo principio estructural que el del pabellón a su propuesta para el parque olímpico de Munich.

Esto llevó a que en 1968 el instituto recibiera el encargo de construir las maquetas del proyecto del parque olímpico para determinar la forma, investigar el comportamiento resistente, medir esfuerzos y deformaciones y proporcionar los patrones para el despiece. Se trabajó intensamente⁶⁵, el

⁶⁵ Para una relación exhaustiva de los trabajos del instituto para esta obra véase A.A.V.V.: "Abriß der Arbeiten von EL, IL, AW für die Dächer Olympia München 1972", en *IL 8 Netze in Natur und Technik*. IL, Stuttgart, 1975. Pág. 267-301.

equipo del instituto creció desmesuradamente con más de cien colaboradores, todo ello en coordinación con otras instancias⁶⁶ encargadas de otras partes del proyecto y la ejecución e integradas por un complejo grupo de arquitectos, ingenieros, matemáticos, geodestas y contratistas, en el que no faltó la polémica por los métodos numéricos o experimentales utilizados⁶⁷. Si la experiencia de este proyecto tuvo un interés innegable para el instituto, no menos cierto fue que esta tarea lo mantuvo apartado del programa de investigación básica inicialmente previsto.

También en 1968 se terminó de construir la sede permanente del instituto aprovechando y adaptando una estructura de prueba que se había construido para el pabellón de Montreal, lo que representó una oportunidad única para poner a prueba y experimentar con el propio edificio que alberga el instituto como estructura ligera en forma de tienda con cubierta de red de cables.

A partir de 1972 el instituto consiguió concentrar sus actividades principalmente en las tareas de investigación básica inicialmente prevista. Se había demostrado que con el método de trabajo empleado y con el tamaño del equipo alcanzado había poca compatibilidad entre la praxis y la investigación. El propio Frei Otto decidió poco

⁶⁶ Ver detalle de las distintas partes involucradas en WILHELM, K.: *Portrait Frei Otto*. Quadriga-Verlag. Berlin, 1985. Pág. 179.

⁶⁷ Véanse el punto de vista de Frei Otto en IL 14 *Arquitectura adaptable*. Gustavo Gili. Barcelona, 1979 (1975). Pág. 8-10, y el de Jörg Schlaich en EEKHOUT, M.: "Frei Otto and the Munich Olympic Games", en Zodiac 21. Milán, 1972. Pág. 54, y también en HOLGATE, A.: *The Art of Structural Engineering. The Work of Jörg Schlaich and his Team*. Axel Menges. Stuttgart, 1997. Pág. 66-69.

tiempo después no realizar ningún proyecto, ni siquiera en su propio estudio, y tan solo asumir trabajos de consultoría o asesoramiento.

Mencionaremos a continuación de forma esquemática algunos de los temas más importantes que fueron objeto de investigación en el instituto.

- Cubiertas transformables o plegables.
- Historia de la construcción ligera.
- Bóvedas o cáscaras de celosía.
- Redes y cables.
- Carpas, membranas y superficies mínimas.
- Grandes naves soportadas por estructuras neumáticas.
- Membranas en el agua. Estructuras ligeras en ingeniería hidráulica.
- El principio de la construcción ligera. Las relaciones recíprocas entre forma, fuerza y masa.
- Biología y construcción. Naturaleza y técnica.

Los estudios y trabajos sobre estos temas estuvieron encuadrados entre 1970 y 1995 en los programas de investigación SFB 64 y SFB 230 auspiciados por el gobierno alemán. Las investigaciones sobre las relaciones entre la biología y las construcciones, entre los objetos de la naturaleza y los de la técnica, fueron objeto de estudio permanente, por un lado en el contexto del grupo "*Biologie und Bauen*", y por otro dando lugar a partir de 1984 a la creación del programa de investigación SFB 230 "*Natürliche Konstruktionen*" (Estructuras naturales).

Todos los trabajos e investigaciones realizados sobre estos temas fueron cuidadosamente documentados en diferentes publicaciones. La serie

denominada *IL Mitteilungen*⁶⁸ (Informes IL) sería la serie de referencia básica que recoge las síntesis finales de los trabajos realizados sobre los diferentes temas, y que nos ofrecería una visión de conjunto de la actividad del instituto.

También sería necesario mencionar aunque sea brevemente la importancia de los colaboradores⁶⁹ del instituto. Sus aportaciones y su biografía quedan reflejadas también en la serie de publicaciones *IL Mitteilungen*, y constituyen por otra parte una muestra palpable de la capacidad de Frei Otto de rodearse de eficaces colaboradores, así como del modo de trabajo del instituto y de la impronta que en ellos dejó, en la que la personalidad y la capacidad de liderazgo de Frei Otto no desempeñaron un papel secundario.

⁶⁸ Ver apartado VIII.5 del capítulo VIII Bibliografía.

⁶⁹ Ver una relación de los más destacados en IL 36 *Subjektive Standorte in Baukunst und Naturwissenschaft*. Krämer. Stuttgart, 1984. Pág. 19.

III.5.1. Participación en programas de investigación gubernamentales.

A finales de la década de los sesenta del siglo XX, hacia 1967, la *Deutsche Forschungsgemeinschaft*, el organismo oficial del gobierno alemán encargado de fomentar y apoyar la investigación, propuso la creación de *Sonderforschungsbereiche* o programas específicos de investigación mediante los que se pretendía que se trabajase de forma interdisciplinar en un determinado tema o área de conocimiento que debía estar vinculado a una determinada universidad. Este planteamiento provocó reacciones encontradas en el colectivo de investigadores, entre las que no faltaron voces en contra afirmando que ello supondría una posición privilegiada para algunas universidades en detrimento de la investigación en otras. Fritz Leonhardt⁷⁰ era entonces rector de la Universidad de Stuttgart y desde el principio se mostró a favor de la implantación de estos programas, viendo en ellos la posibilidad de conseguir medios para estimular en todo caso la investigación en su universidad.

Finalmente a partir de 1969 se inició la implantación de estos programas de investigación⁷¹, consiguiendo la Universidad de Stuttgart uno de ellos, el SFB 64, cuyo contenido se fue centrando cada vez

⁷⁰ Véase LEONHARDT, F.: "Zu den Anfängen des Sonderforschungsbereiches SFB 64", en *Weitgespannte Flächentragwerke. 3. Internationales Symposium SFB 64*. Berichtshefte. Tomo 2. Stuttgart, 1985. Pág. 3.

⁷¹ Para una visión general de estos programas de investigación véase el informe de la *Deutsche Forschungsgemeinschaft* editado por STREITER, Axel y STACKMANN, Karl: *Sonderforschungsbereiche 1969-1984*. VCH. Weinheim, 1985. O bien la publicación editada por STREITER, Axel: *20 Jahre Sonderforschungsbereiche*. VCH. Weinheim, 1989.

más en los tipos de estructuras ligeras de grandes luces en los que Frei Otto estaba trabajando desde su instituto. Este programa tuvo una duración de quince años, y fue sucedido un año antes de su terminación por otro programa de investigación, el SFB 230, también diseñado a la medida de otro de los temas que centraban el interés de Frei Otto y su instituto: las estructuras naturales. Tal como se pretendía desde la creación de estos programas el trabajo se planteó de forma interdisciplinar, participando en ambos programas varios institutos o departamentos de la Universidad de Stuttgart, e incluso también de la Universidad de Tübingen, en el caso del segundo programa, el SFB 230.

Estos programas de investigación específica impulsados y financiados por el gobierno alemán representan por tanto una estructura fundamental que dio soporte material a los trabajos de Frei Otto y su instituto, podríamos decir que creada a su medida, es decir asumiendo como tema para la investigación las áreas que más le interesaban – las estructuras ligeras, la relación entre biología y construcción – y posibilitando la participación de un gran número de colaboradores e institutos universitarios de diferentes especialidades o áreas de conocimientos, siguiendo el planteamiento globalizador e interdisciplinar que ha perseguido siempre Frei Otto.

Vamos a recorrer pues en este apartado en una breve síntesis los orígenes, objetivos y realizaciones de estos dos programas de investigación, de tanta trascendencia en la historia del instituto.

III.5.1.1. El programa de investigación SFB 64 “*Weitgespannte Flächentragwerke*” (Estructuras de grandes luces).

Tal como indicábamos en el punto anterior fue Fritz Leonhardt quien como rector de la Universidad de Stuttgart jugó un papel fundamental para conseguir que se asignara a su universidad uno de estos nuevos programas gubernamentales de investigación, al que inicialmente se le asignó un tema muy genérico, “*Konstruktiver Ingenieurbau*”⁷², que había que perfilar con mayor precisión para darle un contenido más vivo y más vinculado a necesidades concretas. En aquellos años, 1969, se estaba proyectando el parque olímpico de Munich, y a medida que se tenía que ir concretando la definición de la obra para su construcción iban surgiendo nuevos problemas que hasta entonces nunca se habían planteado. Así los nuevos problemas que planteaban estas nuevas estructuras de redes de cables apremiaron y estimularon para convertirse en el tema central para este programa de investigación. De este modo el mundo de ideas de Frei Otto se convirtió en el núcleo del programa.

El comportamiento estático de estas estructuras de redes se podía conocer con suficiente precisión gracias a los métodos entonces disponibles⁷³. La gran dificultad radicaba en la geometría, en lo que podríamos denominar como la definición de los patrones para el despiece, es decir en la determina-

⁷² Se podría traducir como “Estructuras para la ingeniería de la construcción”

⁷³ Véase LEONHARDT, F.: “*Zu den Anfängen des Sonderforschungsbereiches SFB 64*”, en las actas del 3º simposio internacional SFB 64: *Weitgespannte Flächentragwerke*. 3. *Internationales Symposium SFB 64*. Berichtshefte. Tomo 2. Stuttgart, 1985. Pág. 4.

ción de las longitudes exactas de los miles de cables, que era necesario conocer para poder construir este tipo de redes de tal modo que al atirantarse todos los cables estuvieran sometidos a la tensión prevista. En este punto fue decisiva la intervención de dos profesores pertenecientes a sendos institutos de la Universidad de Stuttgart. Por un lado el profesor Argyris, uno de los padres del método de los elementos finitos, y el primero de los profesores de la Universidad de Stuttgart que empezó a trabajar con grandes ordenadores. Por otro lado el profesor y geodesta Linkwitz, que realizó el estudio fotogramétrico de las maquetas de Frei Otto y con métodos geodésicos de compensación de errores pudo determinar con exactitud las longitudes de los cables. Por último también había en el Instituto Otto Graf de Stuttgart excelentes posibilidades para llevar a cabo los ensayos de materiales requeridos.

De este modo se generó para esta obra una colaboración interdisciplinar que también estaba en la base de la filosofía de los nuevos programas de investigación específica que se estaban implantando desde el gobierno. Muchos problemas no pudieron quedar resueltos de forma satisfactoria en el breve periodo de construcción fijado para la obra. Era pues lógico valorar y analizar la experiencia adquirida en este gran proyecto, para abordar a continuación las nuevas cuestiones que habían surgido. Todos los que habían colaborado de forma decisiva en Munich, una buena parte de los institutos de la Universidad de Stuttgart, sintieron el desafío que representaba llegar a dominar este tipo de estructuras. Era pues lógico que se asignara este programa de investigación a la Universidad de Stuttgart y que se eligiera como tema central las

estructuras superficiales o ligeras de grandes luces ("*Weitgespannte Flächentragwerke*"), es decir el tema que daba nombre y razón de ser al instituto y a los trabajos de Frei Otto.

En el programa de investigación SFB 64 participaron once institutos⁷⁴ o departamentos de la Universidad de Stuttgart. Se establecieron seis áreas de trabajo vinculadas a los institutos participantes, cada una de ellas desglosada en una serie de temas o proyectos parciales⁷⁵.

El área de trabajo A, denominada "Estática y dinámica" se centraba, entre otros, en temas de estática y dinámica de maquetas, en estructuras de membranas y en métodos numéricos y experimentales, y tenía entre los directores responsables a John H. Argyris, del *Institut für Computer-Anwendungen* (Instituto de aplicaciones informáticas) y a Lothar Wessolly, del *Institut für Modellstatik* (Instituto de estática de maquetas).

El área de trabajo B, denominada "Proyecto" estaba enteramente vinculada al Instituto de Estructuras Ligeras y dirigida por Frei Otto y Berthold Burkhardt. Las tareas que se planteaba desarrollar eran las siguientes⁷⁶:

⁷⁴ Véase la relación y denominación exacta de los institutos en el informe final del programa de investigación SFB 64, BRINKMANN, G. (ed.): *Leicht und Weit. Zur Konstruktion weitgespannter Flächentragwerke*. VCH. Weinheim, 1990. Pág. 301.

⁷⁵ Véase la relación completa de las áreas y proyectos de trabajo con sus directores responsables y periodo de duración en op. cit. pág. 302-303.

⁷⁶ Véase IL 5 *Wandelbare Dächer*. (1972) pág. 2 y también IL 6 *Biologie und Bauen* 3. (1973) pág. 3.

1. Archivo, documentación y terminología específica en el campo de las estructuras ligeras de grandes luces.
2. Clasificación de las formas y las estructuras en la naturaleza viva y en la técnica como base para el proyecto y la definición de la forma.
3. Investigación de las influencias mutuas entre forma y estructura. Investigación de formas híbridas de estructuras de grandes luces, en las que determinados elementos pueden ser móviles.
4. Métodos de determinación de la forma, técnicas de construcción y de medición de maquetas fijas y móviles, y análisis, evaluación y representación de estructuras ligeras.
5. Análisis y evaluación de experiencias con edificios terminados en lo referente al uso, comportamiento portante, material, etc.

El área de trabajo D, denominada "*Grundlagen der Gestaltung*" (bases para el diseño) estaba dirigida por Jürgen Joedicke y enteramente vinculada al Instituto que él dirigía, el *Institut für Grundlagen der modernen Architektur und Entwerfen* (Instituto de los fundamentos de la arquitectura y el proyecto modernos). Era el grupo de investigación que, dentro del programa SFB 64, representaba a los arquitectos. Los temas en los que trabajaron fueron dos: bases para el diseño, y utilización de las estructuras ligeras de grandes luces. El trabajo se centró⁷⁷ en primer lugar en el estudio de la percepción de estas estructuras entre los usuarios, y en los significados vinculados a ellas. El objetivo era entender las relaciones

⁷⁷ Véase el informe final del programa de investigación SFB 64, BRINKMANN, G. (ed.): *Leicht und Weit*. Op. cit. pág. 287.

entre el tipo y la intensidad de las vivencias subjetivas de la arquitectura y de los atributos de la forma, y desarrollar un procedimiento para aprovechar estos conocimientos en el proyecto de nuevos edificios y en el análisis de edificios existentes.

El área de trabajo E, denominada “*Konstruktion Ingenieurbau*” (estructuras de la ingeniería de la construcción) estaba dirigida por Fritz Leonhardt y Jörg Schlaich y enteramente vinculada al Instituto que entonces dirigía Leonhardt y después dirigió Schlaich, el *Institut für Massivbau* (Instituto de estructuras de hormigón). Los temas en los que centraron sus trabajos fueron, entre otros, documentar los trabajos realizados para la Olimpiada de Munich, el estudio y desarrollo de cables, cordones, conexiones y anclajes, métodos de cálculo, comportamiento portante de redes, dimensionado de estructuras traccionadas de grandes luces, cubiertas de membranas metálicas, y estructuras ligeras de grandes luces construidas con hormigón de fibra de vidrio.

El área de trabajo F, denominada “Geodesia” tenía entre sus directores responsables a Klaus Linkwitz y estaba vinculada al *Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen* (Instituto de las aplicaciones de la geodesia en la construcción). Sus tareas se centraban en la fotogrametría a corta distancia, métodos numéricos matemáticos, mediciones en obras de edificación, dibujo automatizado, y optimización de estructuras ligeras de grandes luces.

Finalmente el área de trabajo K, denominada “Investigación de materiales” estaba dirigida por Gallus Rehm y vinculada al *Institut für Werkstoffe im Bauwesen* (Instituto de materiales de construcción).

Entre sus tareas encontramos el estudio de la corrosión de elementos traccionados, dimensionado de vainas para anclajes, comportamiento a corto y largo plazo de membranas, y resistencia de servicio y durabilidad de cables.

En total colaboraron⁷⁸ unos ciento treinta miembros de los once institutos o departamentos de la Universidad de Stuttgart involucrados en este programa de investigación SFB 64. De ellos treinta y cuatro promocionaron al grado de doctor en el marco de este programa. También hubo cooperaciones externas de miembros del grupo *Biologie und Bauen*, como los biólogos Johann G. Helmcke, Werner Nachtigall, Ernst Kullmann y Adolf Seilacher, así como de otros ingenieros y arquitectos interesados en los trabajos de Frei Otto, como las oficinas de Edmund Happold, Ove Arup y Kenzo Tange, y de empresas como L. Stromeyer & Co., Hoechst y Mero, de Alemania, o la empresa de construcción Seibu, del Japón.

Uno de los frutos más valiosos de este programa de investigación fue el abundante número de publicaciones⁷⁹ que se generó como consecuencia de las investigaciones en las diferentes áreas de trabajo. Además de los artículos publicados en diferentes revistas especializadas, los resultados de las investigaciones encontraron su mejor y más completo reflejo en la colección denominada "*Mitteilungen des SFB 64*" (Informes del programa SFB 64), que

⁷⁸ Véase una lista completa de colaboradores en el informe final del programa de investigación SFB 64, BRINKMANN, G. (ed.): *Leicht und Weit*. Op. cit. pág. 304-310.

⁷⁹ Véase una selección de las publicaciones de cada proyecto parcial y área de trabajo en el informe final del programa de investigación SFB 64, BRINKMANN, G. (ed.): *Leicht und Weit*. Op. cit. pág. 311-326.

alcanzó la estimable cifra de ochenta y cuatro volúmenes. También veintiocho volúmenes de la serie de publicaciones del Instituto de Estructuras Ligeras conocida como "*Mitteilungen des IL*" encontraron apoyo para su publicación en el marco del programa de investigación SFB 64.

Frei Otto fue un importante catalizador y motor en el núcleo de este programa SFB 64. Desarrolló una actividad extraordinaria organizando coloquios y simposios con gran participación internacional. Cabría destacar aquí los tres simposios internacionales sobre el tema del programa de investigación SFB 64 – las estructuras ligeras de grandes luces – celebrados en el marco del propio programa en 1976, 1979 y 1985 con sus correspondientes actas publicadas. Constituyen una muestra de la importante repercusión internacional que tuvieron los resultados de la investigación que propició este programa.

III.5.1.2. El programa de investigación SFB 230 “*Natürliche Konstruktionen*” (Estructuras naturales).

Ya desde la fundación de estos programas gubernamentales de investigación se fijó el criterio de limitar la duración de cada uno de ellos, y así el programa SFB 64, que se había iniciado en 1970, concluyó en 1985, pero antes de llegar el momento de su conclusión, a principios de los ochenta, el Instituto de Estructuras Ligeras y el grupo *Biologie und Bauen* ya habían iniciado los preparativos para la fundación de un nuevo programa, el SFB 230, centrado en el tema “*Natürliche Konstruktionen. Leichtbau in Architektur und Natur*” (Estructuras naturales. La construcción ligera en la arquitectura y en la naturaleza).

Como se puede deducir por lo dicho hasta ahora, no era un tema nuevo para el grupo o el instituto que dirigía Frei Otto. Desde la fundación del grupo *Biologie und Bauen* en 1961 eran ya numerosos los trabajos, las experiencias y los colaboradores involucrados en este tema. Era una cuestión totalmente inserta dentro de los planteamientos globalizadores e interdisciplinarios de Frei Otto por la que él sentía desde hacía ya muchos años un interés cada vez mayor. Una muestra de ese interés y a la vez de los frutos alcanzados con los trabajos realizados fue la publicación en 1982 del libro cuyo título principal coincide con la denominación del nuevo programa SFB: “*Natürliche Konstruktionen. Formen und Strukturen in Natur und Technik und Prozesse ihrer Entstehung*” (Estructuras naturales. Formas y estructuras en la naturaleza y en la técnica y sus procesos de generación). Se creaba así un nuevo programa de investigación, el SFB 230, totalmente a la medida de los intereses y las experiencias de Frei Otto y su instituto, que constituía una oportuni-

dad de seguir trabajando e investigando en las relaciones entre biología y construcción, entre naturaleza y técnica, con una visión global que trascendiera las fronteras de las distintas áreas disciplinares.

El nuevo programa SFB 230 inició su andadura en julio de 1984 y concluyó oficialmente en diciembre de 1995. Fue un proyecto conjunto de dos universidades, la de Stuttgart y la de Tübingen, y en él participaron un total de quince institutos⁸⁰. Las "estructuras naturales", objeto de las investigaciones de este programa, se podrían definir como los sistemas estructurales cuya construcción no deriva de procesos planificados, sino que surge a partir de procesos de autoformación o autoorganización⁸¹. Así pues, los temas que se plantearon para este programa fueron los siguientes⁸²:

- Procesos de autoformación y de autoorganización en todas las áreas de la naturaleza inerte y viviente, y de la técnica, incluyendo la edificación y los procesos de urbanización.
- Autooptimización, y procesos de búsqueda y autogeneración de la forma en la técnica y el arte.
- Mecanismos de comportamiento en los animales y en los hombres con relación a la casa y la ciudad.
- Ensayo de renovación en el entendimiento de la naturaleza.
- Lo estético de las estructuras naturales y técnicas.

⁸⁰ Véase lista completa de los institutos participantes en las actas del 3º simposio internacional SFB 230: *Evolution of natural structures: principles, strategies and models in architecture and nature*. SFB 230. Stuttgart, 1994. Pág. 324.

⁸¹ Véase el prólogo del tomo 2 de las actas del primer simposio internacional SFB 230: *Beiträge zum I Internationalen Symposium des SFB 230*. Teil 2. Stuttgart, 1988. Pág. 4.

⁸² Véase el discurso de Frei Otto en el 3º simposio internacional SFB 230, publicado en el tomo 46 de la serie *Konzepte SFB 230*, OTTO, F.: *Verzweigungen*. Stuttgart, 1995. Pág. 5-6.

El programa SFB 230 estaba estructurado, al igual que el SFB 64, en áreas de trabajo desglosadas a su vez en proyectos parciales vinculados a los diferentes institutos o departamentos participantes. Presentamos a continuación de forma esquemática esta estructura de trabajo con los investigadores responsables y los institutos involucrados en cada proyecto⁸³.

ÁREA DE TRABAJO A: FILOSOFÍA Y CIENCIAS SOCIALES

- Proyecto parcial A 1: Comprensión de la naturaleza. Conceptos fundamentales.

Günther Bien. Instituto de Filosofía, Pedagogía y Psicología (Stuttgart)

Antonio Hernández. Instituto de Historia de la Arquitectura (Stuttgart)

⁸³ Contrástense las estructuras inicial y final en las actas del primer y tercer simposios internacionales SFB 230: *Beiträge zum I Internationalen Symposium des SFB 230*. Teil 1. Stuttgart, 1988. Pág. 244, y *Evolution of natural structures*, op. cit. pág. 324.

ÁREA DE TRABAJO B: BIOLOGÍA

- Proyecto parcial B 1: Evolución de las estructuras.

Wolf-Ernst Reif. Instituto de Geología y Paleontología (Tübingen)

- Proyecto parcial B 2: Morfología estructural de sistemas portantes vegetales.

Adolf Seilacher. Instituto de Geología y Paleontología (Tübingen)

Ulrich Kull. Instituto Biológico (Stuttgart)

- Proyecto parcial B 3: Morfología estructural de esqueletos de animales.

Adolf Seilacher. Instituto de Geología y Paleontología (Tübingen)

Wolf-Ernst Reif. Instituto de Geología y Paleontología (Tübingen)

- Proyecto parcial B 4: Morfología estructural y biomecánica de invertebrados.

Werner Nachtigall. Instituto de Zoología. (Universidad del Sarre)

- Proyecto parcial B 5: Desarrollo de estructuras vegetales de transporte por agua.

Volker Mosbrugger. Instituto de Paleontología (Universidad de Bonn)

ÁREA DE TRABAJO C: ARQUITECTURA

- Proyecto parcial C 1: Procesos de formación de objetos en la naturaleza y en la técnica.

Frei Otto, Jürgen Hennicke. Instituto de Estructuras Ligeras (Stuttgart)

- Proyecto parcial C 2: Procesos naturales: la casa y la ciudad.

Frei Otto, Eda Schaur. Instituto de Estructuras Ligeras (Stuttgart)

Klaus Humpert. Instituto Urbanístico (Stuttgart)

- Proyecto parcial C 3: Historia de la construcción.

Frei Otto, Rainer Graefe. Instituto de Estructuras Ligeras (Stuttgart)

- Proyecto parcial C 5: Procesos proyectuales.

Frei Otto. Instituto de Estructuras Ligeras (Stuttgart)

ÁREA DE TRABAJO D: INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

- Proyecto parcial D 1: Procesos generadores de la forma en la naturaleza y en la ingeniería de la construcción.

Gallus Rehm, Rainer Blum. Instituto de Materiales de Construcción (Stuttgart)

- Proyecto parcial D 2: Estática de los vegetales.

Gallus Rehm, Rainer Blum. Instituto de Materiales de Construcción (Stuttgart)

- Proyecto parcial D 3: Optimización de formas constructivas naturales.

Klaus Linkwitz. Instituto de las Aplicaciones de la Geodesia en la Construcción (Stuttgart)

Ekkehard Ramm. Instituto de Estática de la Construcción (Stuttgart)

- Proyecto parcial D 4: Generación y optimización de la forma de estructuras naturales.

Klaus Linkwitz, Joachim Bahndorf. Instituto de las Aplicaciones de la Geodesia en la Construcción (Stuttgart)

- Proyecto parcial D 5: Optimización de la estructura de construcciones naturales.

Ekkehard Ramm, Kai-Uwe Bletzinger. Instituto de Estática de la Construcción (Stuttgart)

- Proyecto parcial D 6: Materiales para la construcción ligera en la naturaleza y en la técnica / Mecánica experimental.

Robert K. Müller, Lothar Wessolly. Instituto de Estática de Maquetas (Stuttgart)

- Proyecto parcial D 7: Construcción ajustada a la madera como material natural.

Hans-Wolf Reinhardt. Instituto de Materiales de Construcción (Stuttgart)

Simon Aicher. FMPA Baden-Württemberg (Stuttgart)

- Proyecto parcial D 8: Recogida, análisis y administración de datos a partir de información gráfica de iconos.

Werner Nachtigall. Instituto de Zoología. (Universidad del Sarre)

Klaus Humpert. Instituto Urbanístico (Stuttgart)

Klaus Linkwitz. Instituto de las Aplicaciones de la Geodesia en la Construcción (Stuttgart)

ÁREA DE TRABAJO E: CIENCIAS NATURALES

- Proyecto parcial E 1: Procesos y estructuras auto-generadas – Sinérgica.

Wolfgang Weidlich, Günter Haag, Rolf Reiner.
Instituto de Física Teórica (Stuttgart)

- Proyecto parcial E 2: Principios de la autoorganización y evolución.

W. Ebeling, H. Malchow, A. Wunderlin

También este programa de investigación propició un abundante número de publicaciones como consecuencia de las investigaciones en las diferentes áreas de trabajo y como expresión de sus resultados. En primer lugar habría que mencionar la serie "Konzepte des SFB 230" formada por 50 volúmenes de pequeño formato que constituían los documentos internos de trabajo de las distintas áreas y proyectos parciales como material de base para los foros de debate y elaboración de temas todavía no suficientemente maduros para una publicación de difusión externa al programa. Tiene el interés de mostrar el proceso de aproximación de las reflexiones en torno a los temas propuestos partiendo de las distintas disciplinas con el propósito de encontrar puntos de encuentro o nuevas visiones o conclusiones en un contexto que se pretendía multidisciplinar.

Por otro lado también se publicó la serie "Mitteilungen des SFB 230" con la intención de hacer accesible a un público más amplio los resultados del trabajo de los proyectos parciales, mostrando en

especial las relaciones de los distintos trabajos entre sí y con el tema general del programa de investigación. De los nueve volúmenes que se publicaron seis correspondieron a las actas de los tres simposios internacionales que se celebraron sobre el tema del programa de investigación SFB 230.

En la serie de publicaciones del propio Instituto de Estructuras Ligeras conocida como "*Mitteilungen des IL*" un buen número de volúmenes encontraron apoyo para su publicación en el marco del programa de investigación SFB 230. Entre ellos los dedicados a las diatomeas (IL 28), las radiolarias (IL 33 y 38), las películas de jabón (IL 18), las construcciones de bambú (IL 31), la clasificación de formas y estructuras (IL 22 y 23), las estructuras neumáticas y los huesos (IL 35), y los procesos de formación de los asentamientos no planificados (IL 39). Por último cabría mencionar también otras publicaciones emanadas de este programa, como el libro de la serie *Arcus* escrito por el propio Frei Otto y titulado "*Gestaltwerdung. Zur Formentstehung in Natur, Technik und Baukunst*" (La evolución de la forma. Sobre el origen de la forma en la naturaleza, la técnica y la arquitectura)⁸⁴.

También fueron numerosos los encuentros de trabajo, coloquios, y seminarios que se organizaron en el marco de las diferentes áreas y proyectos de este programa. Como ya indicábamos anteriormente se organizaron tres simposios internacionales en 1988, 1991 y 1994, con sus correspondientes actas publicadas, que recogieron aportaciones en relación con el tema general del programa procedentes de

⁸⁴ OTTO, Frei: *Gestaltwerdung. Zur Formentstehung in Natur, Technik und Baukunst*. R. Müller. Köln, 1988. (*Arcus*, 4).

especialistas de muy distintos campos no ya sólo de otras universidades alemanas sino también extranjeras, además de los miembros del propio programa en las universidades de Stuttgart y Tübingen.

Para concluir podríamos decir que el programa de investigación SFB 230 sobre las estructuras naturales se podría considerar como uno de los grupos interdisciplinarios de investigación más importantes de su tiempo por el amplio espectro de campos o disciplinas que englobaba. Arquitectos, ingenieros, urbanistas, geodestas, biólogos, paleontólogos, filósofos, historiadores, físicos y sinérgicos formaron un numeroso grupo por otra parte no exento de tensiones internas y diferencias de criterios que, junto a los colaboradores de su propio instituto, Frei Otto supo aglutinar, estimular y motivar en torno a una visión global e integradora de la naturaleza y la técnica que constituyó una referencia internacional.

III.5.2. La metodología experimental y la búsqueda de la forma resistente: sistematización de los procesos físicos de autogeneración de la forma.

Todos los experimentos realizados durante toda la larga trayectoria de Frei Otto y sus colaboradores descrita en los apartados anteriores, desde el Centro para el Desarrollo de la Construcción Ligeras (*Entwicklungsstätte für den Leichtbau*) de Berlín hasta el Instituto de Estructuras Ligeras (*Institut für leichte Flächentragwerke*) de Stuttgart, incluyendo los realizados para la tesis, los de los cursos impartidos en universidades americanas, o los realizados en el propio estudio o taller de arquitectura en Warmbronn, constituyen un vasto y rico patrimonio ampliamente documentado en el actual archivo gráfico del Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart.

Este vasto patrimonio de maquetas y ensayos refleja un modo de trabajo, una metodología exploratoria de la forma resistente en la que el experimento aparece como instrumento para alcanzar el objetivo de la construcción ligera o de optimización de la forma mediante la observación de las estructuras naturales y los fenómenos físicos, regidos por leyes que se ubicarían en el contexto de un principio más general de economía cósmica⁸⁵.

El concepto de "estructura natural" ha ido apareciendo en diferentes momentos a lo largo de la trayectoria de Frei Otto anteriormente descrita, desde la publicación de la tesis doctoral, en la que se define el concepto de "*natürliches Tragwerk*" (estructura

⁸⁵ Véase la nota 18.

natural) como “la forma de una estructura que, con la menor cantidad de material, transporta los esfuerzos que recibe a los puntos de reacción o de apoyo”⁸⁶, hasta el programa de investigación SFB 230, en el que se definen las “*natürliche Konstruktionen*” (estructuras naturales), objeto de las investigaciones de ese programa, como “los sistemas estructurales cuya construcción no deriva de procesos planificados, sino que surge a partir de procesos de autoformación o autoorganización”⁸⁷. Y también de modo similar presenta Frei Otto este concepto en otro lugar: “Se habla de estructuras naturales también en la técnica cuando sus formas no son manipuladas externamente por el hombre, sino que se desarrollan por sí mismas, se forman, se organizan, se optimizan a partir de las condiciones del problema o la tarea de partida”⁸⁸.

La fascinación producida por los objetos de la naturaleza y su diversidad y por los fenómenos físicos fundamenta este interés en los experimentos y ensayos cuyo resultado es la forma de objetos que surge a partir de procesos que se desarrollan por sí mismos, o procesos de autogeneración, controlados por las leyes de la naturaleza. Cuando un objeto muestra con una claridad especial y una perfección “clásica” una forma típica producida mediante estos procesos, se le denomina una “estructura natural”, aunque se trate de un producto de la técnica. Las estructuras naturales, según esta definición, son el resultado de procesos de optimización regidos por un principio de economía cósmica según el cual la reducción del consumo de masa y energía con un rendimiento

⁸⁶ Véase la nota 39.

⁸⁷ Véase la nota 81.

⁸⁸ Véase el prólogo de OTTO, F. et alt.: *Seifenblasen / Forming bubbles*. Krämer. Stuttgart, 1988. (IL 18). Pág. 6. La traducción es propia.

constante, o bien el consumo constante con un rendimiento mayor, se considerarían como un criterio esencial de la evolución en la naturaleza y del desarrollo en la técnica.

Uno de los ejemplos más conocidos de procesos físicos a partir de los cuales se generan formas que desde el principio están optimizadas son, tal como señala Frei Otto⁸⁹, las pompas de jabón, las superficies mínimas y las formas de fluidos, que sólo en muy pocas formas pueden existir porque son muy sensibles. En ninguna otra forma pueden existir, tan solo en una que podríamos denominar optimizada, en formas mínimas. El problema de la búsqueda de la superficie mínima que se puede desarrollar en un contorno cualquiera se resuelve con la ayuda de láminas o películas de jabón que se tensan dentro del borde dado, de tal forma que se genera la forma de una superficie mínima por el equilibrio del flujo de moléculas. La propiedad física más importante de esta superficie a efectos constructivos o de diseño, además de ser la superficie más pequeña posible, es la igualdad de tensiones en todos los puntos y en todas las direcciones de la superficie, que resulta del nivel de energía más bajo posible.

Tal como indicábamos anteriormente⁹⁰, Frei Otto empezó a experimentar con pompas de jabón en los años cincuenta porque buscaba un método para encontrar la forma más adecuada de estructuras muy ligeras con el máximo ahorro de material, tales como las carpas o las estructuras neumáticas. Los inicios de este tipo de experimentos tuvieron por

⁸⁹ Ver transcripción de la conversación mantenida con Frei Otto el 7 de junio de 2004.

⁹⁰ Véase nota 48

tanto un carácter aplicado, con una finalidad práctica concreta. Pero pronto se obtuvieron resultados que no sólo eran útiles para responder a exigencias específicas, sino que además tenían una validez general. De este modo dio comienzo una investigación básica que condujo a Frei Otto y sus colaboradores a otras disciplinas como la Biología, las Matemáticas, la Física y la Geodesia, abriéndose así un vasto campo de investigación al considerar la amplia variabilidad de formas que se pueden generar a partir de procesos de autoformación, que va mucho más allá de la aplicación directa a la arquitectura. Así entre 1958 y 1965 se llevaron a cabo muchos experimentos con películas de jabón que correspondían más bien a un tipo de investigación básica, sin pensar en aplicaciones prácticas en forma de construcciones, abordándose cuestiones como los caminos mínimos, un problema que ya se había planteado en el campo de las Matemáticas – el problema de Steiner – que propició contactos con especialistas en este campo y el diseño y construcción de un aparato específico. Tal como indica su colaborador Jürgen Hennicke⁹¹, el objetivo fundamental de Frei Otto era explicar los fenómenos de la naturaleza mediante métodos propios de ella, no tanto con la finalidad de construir o diseñar edificios o estructuras.

Por otro lado el propio Frei Otto advierte que es poco científico tomar la naturaleza como modelo. La naturaleza, dice, “no es imitable, porque es muy complicada. En principio es muy sencilla, pero en los efectos es muy complicada. Todo el mundo me atri-

⁹¹ Ver transcripción de la conversación mantenida con Jürgen Hennicke el 15 de octubre de 2004.

buye que mi ocupación en la biología sólo la utilizo para crear una nueva arquitectura. Esto no es cierto. Simplemente tan solo quiero saber, con gran curiosidad, lo que es la naturaleza”⁹². Esta actitud de Frei Otto hacia la naturaleza y el sentido que adquiere su metodología experimental quedan reflejados en su libro *Natürliche Konstruktionen*, cuando afirma que “la naturaleza viviente no se revela a quien la estudia con la única finalidad de aprovecharla; se manifiesta en cambio a quien indaga las causas y los efectos sin intenciones premeditadas”⁹³.

Los experimentos han sido pues un instrumento para jugar con diferentes fenómenos físicos, observando las formas que se producían e intentando reconocer la lógica propia que los resultados de ese juego iban generando, para pensar en nuevas posibilidades y variaciones acordes con esa lógica, y por lo tanto inicialmente ajenas a toda otra lógica, como la que podría suponer la pretensión de aplicar las formas obtenidas para la construcción de edificios.

Este juego con experimentos permitió descubrir fortuitamente formas inesperadas, algunas de las cuales resultaron ser después nuevas formas estructurales enteramente desconocidas. Así se llegó a encontrar en 1964, gracias a los experimentos con películas de jabón, la forma de soporte apuntado de una red de cables mediante un cable en forma de lazo o bucle que formaba una línea de curvatura constante de bastante complejidad geométrica⁹⁴.

⁹² Ver transcripción de la conversación mantenida con Frei Otto el 7 de junio de 2004.

⁹³ Véase OTTO, F. et al.: *Natürliche Konstruktionen. Formen und Strukturen in Natur und Technik und Prozesse ihrer Entstehung*. Deutsche Verlags-Anstalt. Stuttgart, 1982. Pág. 8.

⁹⁴ Véase la introducción de OTTO, F. et al.: *Seifenblasen / Forming bubbles*. Krämer. Stuttgart, 1988. (IL 18). Pág. 17.

Esta metodología experimental va ligada a un conocimiento profundo, cualitativa y perceptivamente, de los fenómenos y los procesos físicos, que le permite a Frei Otto inventar los métodos del experimento según el tipo de problema planteado en cada caso, viendo siempre infinitas posibilidades. Así lo afirma el propio Frei Otto: "Con respecto a eso no hay límites, se puede recurrir a lo que se quiera. Es totalmente libre el que se utilice hilos, agua, yemas de huevo o cualquier cosa con la que se pueda experimentar. Lo importante es que de los resultados se puedan extraer conocimientos. Para cada problema encontramos nuevos métodos específicos. Lo más importante es que para una tarea actual hagamos el experimento adecuado"⁹⁵. Así pues, para una tarea concreta de diseño o problema constructivo la maqueta física resuelve el problema de encontrar la forma adecuada seleccionando un material para el experimento cuyas propiedades físicas son análogas al problema. Un ejemplo de esto sería el ya mencionado anteriormente⁹⁶ de la búsqueda de la superficie mínima que se puede desarrollar en un contorno cualquiera con la ayuda de experimentos realizados con películas de jabón.

Para Frei Otto la construcción es ciencia de la naturaleza. Ciencia de la naturaleza aplicada. Sin embargo, dice Frei Otto, "las cuestiones de las ciencias naturales realmente no tienen ya nada que ver con la arquitectura de hoy. Pero sí que han tenido que ver siempre con la arquitectura de la edad media hasta los tiempos modernos. Sólo en la actualidad el arquitecto se desentiende de las ciencias

⁹⁵ Ver transcripción de la conversación mantenida con Frei Otto el 7 de junio de 2004.

⁹⁶ Ver página 150.

naturales. En otro tiempo los arquitectos eran los físicos de vanguardia. Fueron ellos los que realizaron las construcciones más altas, los experimentos más grandes que hubo. Hoy tanto ellos como los ingenieros de la construcción han dejado de ser ya científicos de primer orden”⁹⁷.

Esta metodología experimental y la exploración de los fenómenos físicos tan característica en la obra y en los trabajos de Frei Otto y sus colaboradores supone, como decíamos al comienzo de este capítulo, una concepción de la forma no como un *a priori*, sino como resultado de un proceso de búsqueda en el que lo resistente tiene la exigencia de ser desvelado formalmente. El concepto de “*Formfindung*” (búsqueda de la forma), se contrapone así al de “*Formgebung*” (modelado de la forma). Aparece con ello un nexo de continuidad con los planteamientos de la arquitectura racionalista de los años veinte, uno de cuyos exponentes más destacados sería la Bauhaus. Y es precisamente el propio Walter Gropius quien reconoce esta continuidad, cuando en una visita a Frei Otto en Berlín le dijo a este último que él era entonces el único que continuaba trabajando en la línea por él marcada, precisamente porque no partía de unos planteamientos formales, sino porque buscaba con experimentos la forma de la arquitectura del futuro. Gropius, continúa Frei Otto⁹⁸, “estaba muy bien informado de lo que yo estaba haciendo, y vio en ello uno, o quizás incluso el único camino hacia el futuro”. Consideraba a Frei Otto un continuador de sus principios fundamentales. Gropius “no quería una arquitectura formal, sino más

⁹⁷ Ver transcripción de la conversación mantenida con Frei Otto el 7 de junio de 2004.

⁹⁸ *Ibidem*.

bien una arquitectura que se fundamentara en las ciencias naturales. Mies van der Rohe era otra cosa. Mies tendía más a buscar la forma mediante la creación, la elaboración o la construcción de la forma. Mies proyectaba formas arquitectónicas. Gropius no buscaba las formas, sino lo esencial, lo sustancial". Se contraponen aquí la búsqueda de la forma ("*Gestalt suchen*") con la construcción de la forma ("*Gestalt machen*").

Frei Otto vincula los experimentos físicos con maquetas a la posibilidad de inventar, de encontrar lo no buscado, algo que el ordenador no puede nunca conseguir, aunque sea hoy en día una importante herramienta para la optimización y para la búsqueda de formas. "Con el ordenador – afirma Frei Otto – sólo se puede calcular lo que en realidad conceptualmente ya está en él. Sólo encuentras lo que buscas, lo no buscado no se puede encontrar con el ordenador. Sin embargo con la experimentación libre sí se puede encontrar lo no buscado"⁹⁹. Frei Otto piensa que sus invenciones más importantes proceden "en gran parte de observaciones fortuitas o casuales realizadas durante los experimentos. Algunos experimentos por cierto planteados de forma totalmente sistemática. Siempre he combinado la experimentación sistemática con la experimentación fortuita o casual, dándole al azar una oportunidad pero también teniendo siempre en consideración una sistematización, de modo que cuando se descubre algo accidentalmente no ser tan tonto como para desecharlo simplemente porque no encaja en la sistematización". La generación de formas a través de

⁹⁹ *Ibidem*.

procesos físicos y la observación de los fenómenos naturales han sido pues decisivos en la experiencia de Frei Otto para la invención de nuevas estructuras, algo que según su visión no pueden llegar a alcanzar los ordenadores por regirse por leyes creadas e impuestas por el hombre.

La metodología experimental de Frei Otto plantea pues una dialéctica entre la búsqueda y la creación de la forma, entre los procesos de optimización y los procesos creativos, entre la búsqueda de la forma siguiendo procesos físicos de autogeneración y el proceso de definición de la forma en el proyecto arquitectónico. Acerca de ello Frei Otto dice: "Nunca fue objetivo del IL desarrollar una teoría del proyecto. Su objetivo fue encontrar, estimular, conocer y observar tantos procesos abióticos de autoformación como fuera posible y comprender sus implicaciones. De este modo hemos encontrado muchas formas y estructuras anteriormente no conocidas"¹⁰⁰. Los procesos físicos de autoformación han sido en la experiencia de Frei Otto y su instituto un instrumento fundamental para entender las relaciones entre forma, fuerza y masa, teniendo como objetivo último el principio de la construcción ligera. Este objetivo implica un proceso de optimización: construir, transmitir cargas, con un consumo mínimo de masa y energía.

Pero el proceso de definición de la forma en el proyecto arquitectónico es un proceso complejo en el que entran en juego además otras componentes que forman un preciso sistema de relacio-

¹⁰⁰ Véase el prólogo de Frei OTTO en GASS, Siegfried: *Experimente / Experiments*. Krämer. Stuttgart, 1990. (IL 25). Pág. 0.5.

nes, de manera que no sólo están presentes, sino que están necesariamente fundidas, resueltas y disueltas en ese “algo más” que constituye la resultante “arquitectura”. Tal como afirma Jürgen Joedicke, “la forma óptima en la arquitectura es una ficción, porque no es posible determinar un óptimo, que es la condición para la búsqueda de una forma óptima. El proyecto es un proceso complejo, difícil, en el que hay que integrar condicionantes, exigencias o requerimientos a menudo heterogéneos. Es el intento de una continua aproximación y mejora, que sin embargo en su conjunto no es optimizable”¹⁰¹. En el ámbito de la arquitectura, al igual que en el de la naturaleza, no se puede optimizar siguiendo exclusivamente criterios únicos o individuales. El ejemplo de los organismos biológicos – observa Siegfried Gass¹⁰² – muestra cómo cuando se pueden realizar o satisfacer diferentes funciones al mismo tiempo surgen objetos que no necesariamente se pueden calificar de óptimos con respecto a una determinada exigencia o requerimiento.

Por otro lado, en los procesos físicos de autoformación el diseñador no está totalmente sometido a la forma que se desarrolla por sí sola, sino que ésta está sujeta más bien a la decisión voluntaria de buscar una forma correcta para el concepto o la idea global del proyecto mediante una adecuada selección del proceso físico de autoformación y de las correspondientes condiciones de borde. Los experi-

¹⁰¹ Véase JOEDICKE, J.: *Weitgespannte Flächentragwerke als Mittel der Architektur*, en la introducción al informe final del programa de investigación SFB 64, BRINKMANN, G. (ed.): *Leicht und Weit*. Op. cit. pág. 7.

¹⁰² GASS, S., op. cit. pág. 7.2.

mentos físicos con maquetas, tal como reconoce el propio Frei Otto, son pues "sólo medios auxiliares. Son instrumentos para los que saben cómo utilizarlos, nada más"¹⁰³.

Pero aun siendo esta metodología experimental un medio y no un fin en sí misma, Frei Otto tampoco considera al arquitecto como un modelador o creador de la forma ("*Formgeber*" o "*Formmacher*") que pretende ejercer un control absoluto de ella. Así, con relación a esta voluntad de dar forma del arquitecto, Frei Otto afirma: "No se trata del diseño como objetivo por sí mismo, o de la autorrealización de algún arquitecto o promotor. Se trata de la mejor solución, independientemente de donde proceda. ¿Por qué tenemos que maltratar y explotar a nuestra madre la Tierra con egoísmos arquitectónicos violentos si se logra evitar todo exceso tan fácilmente con procesos de autoformación afines a la naturaleza?"¹⁰⁴. De nuevo encontramos aquí el trasfondo de una visión globalizadora de la arquitectura en concordancia con la naturaleza, con ese ideal de economía en un sentido cósmico, que supone acuerdo con el universo.

Esta visión globalizadora permite vincular la forma a su proceso de generación, observando cómo todos los objetos materiales de la naturaleza inanimada, de la naturaleza viviente o muerta, así como de la técnica, poseen una forma característica que es expresión y reflejo de su proceso de generación. Las investigaciones de Frei Otto y su instituto han

¹⁰³ Véase el prólogo de Frei OTTO en GASS, Siegfried: *Experimente / Experiments*. Krämer. Stuttgart, 1990. (IL 25). Pág. 0.5.

¹⁰⁴ Véase la entrevista realizada a Frei Otto por Michael Andritzky en el informe final del programa de investigación SFB 64, BRINKMANN, G. (ed.): *Leicht und Weit*. Op. cit. pág. 276.

explorado esa relación entre las formas y sus procesos de generación, centrándose en aquellos objetos cuya forma viene determinada por procesos que se desarrollan siguiendo las leyes de las ciencias naturales, y estudiando procesos de generación de la forma o procesos de autoformación que conducen a formas que, manteniendo constantes las condiciones de borde, son reproducibles¹⁰⁵.

Estos procesos de autogeneración de la forma vienen determinados, además de por las propiedades características de los materiales implicados en ellos, en gran medida por las fuerzas internas y externas que actúan en un objeto, que son transmitidas por el objeto, o que actuaron durante la formación del objeto. Los objetos que proceden de un proceso de autoformación son pues también reflejo de un estado de equilibrio.

Muchos de los experimentos realizados o dirigidos por Frei Otto tenían como finalidad mostrar las formas típicas que se producen en los procesos de autoformación, reconocer leyes determinadoras de la forma y explorar la influencia de las condiciones de borde para llegar a alcanzar una visión global de la diversidad de formas que se pueden generar en la naturaleza sin codificación genética, o bien en la técnica sin la voluntad configuradora propia del hombre. Tal como señala Siegfried Gass¹⁰⁶, muchas de estas formas típicas aparecen en contextos muy distintos, es decir, los principios generadores de la forma proporcionan indicios de posibles aspectos

¹⁰⁵ Véase GASS, S.: "*Selbstbildungsprozesse und ihre Bedeutung für das Entwerfen*", en las actas del primer simposio internacional SFB 230: *Beiträge zum I Internationalen Symposium des SFB 230. Teil 2*. Stuttgart, 1988. Pág. 228.

¹⁰⁶ *Ibidem*.

comunes en el proceso de generación de la forma. “Lo que parece similar puede haberse generado de modo similar y puede servir también para cometidos o tareas similares análogamente bien”.

Vamos a presentar a continuación una síntesis esquemática de estos experimentos para la generación de formas características a partir de procesos físicos de autoformación realizados o analizados por Frei Otto y sus colaboradores. Para mostrar una visión panorámica y ordenada del amplio y vasto patrimonio que constituyen todos estos experimentos realizados durante toda la larga trayectoria de Frei Otto y sus colaboradores nos apoyaremos en la tesis doctoral de Siegfried Gass, uno de los colaboradores de la última etapa de Frei Otto como director del Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart, que fue publicada en 1990 con el título “Experimentos” como el tomo IL 25 en la serie *Mitteilungen* de publicaciones del instituto. Remitimos a esta obra¹⁰⁷ para una más amplia información acerca estos experimentos y procesos.

La sistematización de estos experimentos que se plantea en este estudio se basa fundamentalmente en dos criterios diferenciados que generan dos clasificaciones: una basada en las fuerzas que actúan en una estructura, que pueden ser transmitidas por ella, o que estuvieron activas durante su desarrollo, y la otra basada en la forma del objeto que se genera en el experimento. Daremos a continuación una relación detallada de los tipos de experimentos ordenada según las formas generadas, y presentaremos después dos cuadros sinópticos de las dos clasificaciones mencionadas (Fig. 51 y 52).

¹⁰⁷ GASS, Siegfried: *Experimente / Experiments*. Krämer. Stuttgart, 1990. (IL 25).

Experimentos y procesos físicos de autogeneración de la forma

I. Elementos lineales.

I.1 Filamentos de fluidos y espigas.

I.2 Formas colgadas traccionadas.

- Recta.
- Catenaria.
- Formas aditivas de catenarias.

I.3 Formas antifuniculares comprimidas.

- Cadena "erguida".
- Línea de empujes.
- Arco "vaciado".

I.4 Línea de flexión.

- Parábola.
- Arco de circunferencia.
- Formas combinadas.

I.5 Estructuras ramificadas.

- Ramificaciones abiertas.
- Ramificaciones de malla cerrada.
- Caminos mínimos.
- Nudos espaciales de tres barras.
- Nudos de cuatro barras.
- Nudos de cinco barras.
- Nudos de seis barras.

II. Elementos superficiales.

II.1 Superficies mínimas.

- Láminas de líquidos.
- Soporte de superficies mínimas.
- Superficies mínimas aproximadas.
- Redes.
- Membranas de fluidos viscosos.

II.2 Estructuras neumáticas.

- Esfera.
- Gotas.
- Adición de estructuras neumáticas esféricas.
- Burbujas sobre bordes predefinidos.
- Estructuras neumáticas abiertas.
- Tubos.
- Estructuras neumáticas soportadas por redes.
- Atados, tirantes y puntales interiores.
- Estructuras neumáticas con presión negativa.
- Abolladuras.
- Cambio de forma.
- Rigidización de estructuras neumáticas.

II.3 Formas colgadas traccionadas.

- Elementos superficiales suspendidos verticalmente.
- Elementos superficiales suspendidos horizontalmente.
- Redes colgadas.

II.4 Formas antifuniculares comprimidas.

- Cáscaras invertidas.
- Cáscaras de celosía.

II.5 Estructuras solicitadas a compresión y a flexión.

- Pliegues.
- Abolladuras.

III. Objetos espaciales.

III.1 Aglomeraciones de material traccionadas.

III.2 Aglomeraciones de material comprimidas.

- Amontonamientos de gránulos y embudos de drenaje.
- Cavidades.
- Generación de la forma por erosión.

III.3 Cristales.

IV. Estructuras en el espacio y en el tiempo.

IV.1 Ondas.

IV.2 Sistemas sometidos a vibración.

IV.3 Torbellinos.

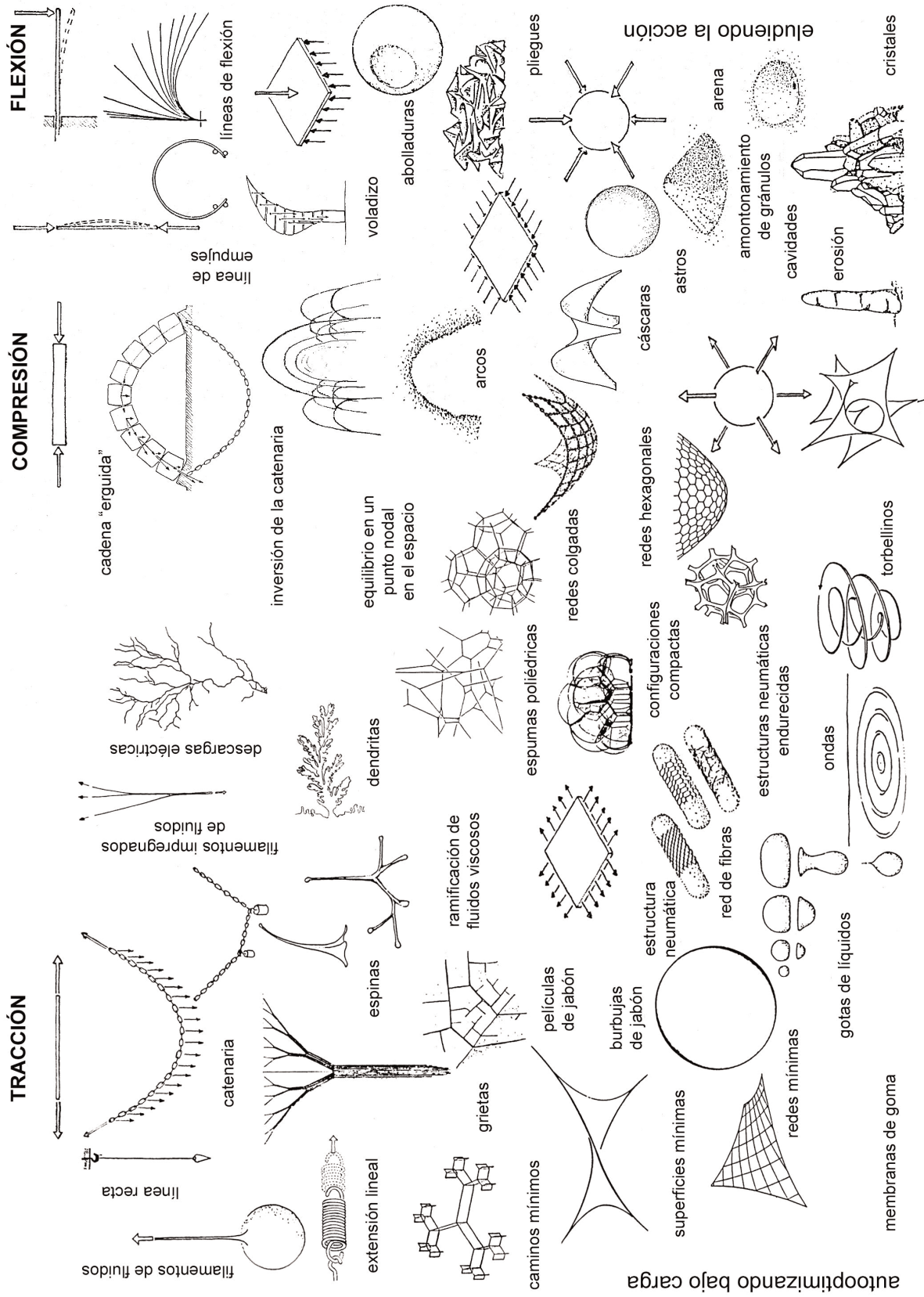
- Remolino en espiral.
- Torbellino anular.
- Células Bénard.
- Remolino de Taylor.

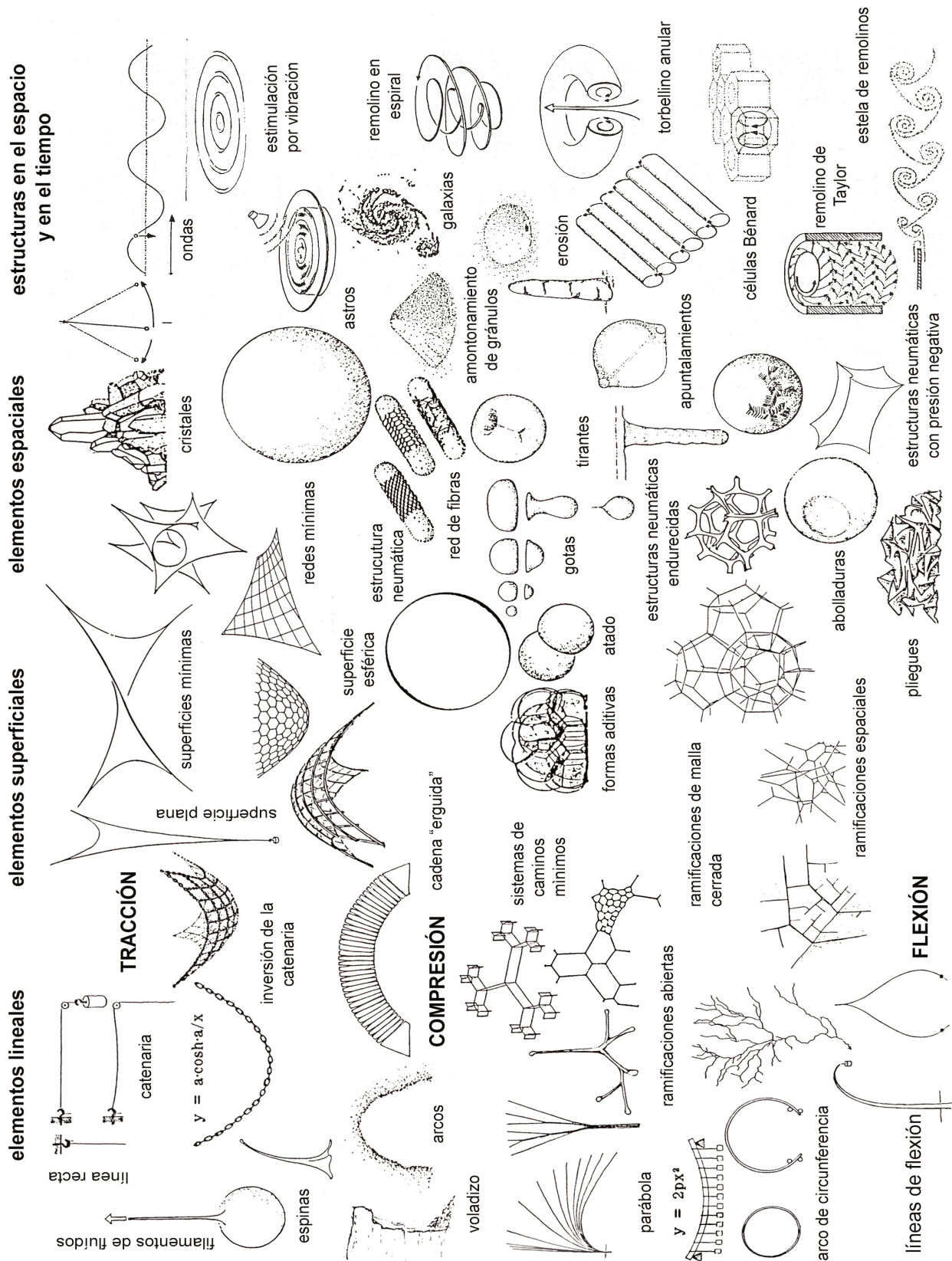
IV.4 Turbulencias.

(páginas siguientes)

Fig. 51. Sinopsis de las estructuras generadas por procesos de autoformación clasificadas según las fuerzas generadoras. Fuente: GASS, Siegfried: *Experimente*. (IL 25). Pág. 2.17.

Fig. 52. Sinopsis de las estructuras generadas por procesos de autoformación clasificadas según las formas generadas. Fuente: GASS, Siegfried: *Experimente*. (IL 25). Pág. 2.25.





IV. Frei Otto y la sistematización de la forma

La forma. Propuesta de clasificación y descripción.

El origen de los trabajos sobre la clasificación de las formas se remonta a los años comprendidos entre 1958 y 1962¹⁰⁸, en los que Frei Otto intentó establecer una clasificación de las formas que sirviera al mismo tiempo para llegar a una clasificación de las estructuras. La ocasión que propició estos trabajos fueron unos cursos impartidos por Frei Otto como profesor visitante en St. Louis, New Haven, Berkeley y Cambridge (Estados Unidos) durante aquellos años. Fue entonces cuando se enunciaron y fueron perfilándose los conceptos de la forma uni-, bi- y tridimensional. Una primera exposición global de los trabajos realizados se presentó en 1962 y 1963, en un curso de vacaciones impartido para la Universidad de Maracaibo en Venezuela. El estudio de las formas de los objetos materiales se hizo cada vez más necesario dentro del objetivo de llegar a desarrollar una clasificación de las estructuras que tuviera una validez lo más amplia posible, ya en el marco del *Entwicklungsstätte für den Leichtbau* (Taller para el desarrollo de la construcción ligera) de Berlín, y, desde 1964, en el Instituto para las estructuras ligeras de Stuttgart.

El tema fue objeto de una primera publicación resumida en 1979¹⁰⁹, y posteriormente se siguió trabajando de forma colectiva en el instituto para publicarse en 1984¹¹⁰ la versión correspondiente a los trabajos realizados hasta el momento, como primer volumen de la serie

¹⁰⁸ Véase OTTO, Frei (ed.): *IL 22. Form: ein Vorschlag zur Entwicklung einer Methode zur Ordnung und Beschreibung von Formen. Form-Kraft-Masse 2*. K. Krämer. Stuttgart, 1988. Pág. 10.

¹⁰⁹ OTTO, F.: "die Form", en *IL 21. Grundlagen. Form-Kraft-Masse 1*. K. Krämer. Stuttgart, 1979. pág. 14-23.

¹¹⁰ OTTO, F.: *Form: ein Vorschlag zur Entwicklung einer Methode zur Ordnung und Beschreibung von Formen*. Universidad de Stuttgart. Stuttgart, 1984. (Konzepte SFB 230; 1)

titulada "Konzepte", que reunía los documentos de trabajo para la *Sonderforschungsbereich 230 "Natürliche Konstruktionen"* (Programa específico de investigación 230 "Estructuras naturales", auspiciado por el gobierno alemán). En 1988¹¹¹ el instituto publicó el volumen IL 22 de la serie "Mitteilungen", dedicado enteramente a la clasificación de las formas, y en 1992¹¹² el volumen IL 23, dedicado a la clasificación de las estructuras, con una primera parte en la que se retomaba el tema de la clasificación de las formas. Estos dos volúmenes formaban parte, a su vez, de una serie de 5 volúmenes dedicados al estudio de la relación entre la forma, la estructura y la masa, y al principio de la construcción ligera.

Así pues la necesidad de encontrar un método de clasificación de las formas ha sido largamente sentida a lo largo de los trabajos de Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras. Se trataba de encontrar un método que fuera válido para todos los objetos conocidos. Un método que por un lado fuera tan amplio e "impreciso" que pudiera abarcar todas las formas, mientras que por otro lado fuera tan detallado que permitiera clasificar y describir con suficiente precisión todas las formas sin excepción¹¹³.

El objetivo era ambicioso. Se trataba de arrojar alguna luz sobre la globalidad de la infinita diversidad de formas de los objetos que nos rodean. El término "forma" se utiliza aplicado exclusivamente a los objetos materiales, es decir, a los objetos que tienen

¹¹¹ OTTO, F. (ed.): *IL 22. Form: ein Vorschlag zur Entwicklung einer Methode zur Ordnung und Beschreibung von Formen. Form-Kraft-Masse 2*. K. Krämer. Stuttgart, 1988.

¹¹² OTTO, F.: "die Form", en *IL 23. Konstruktion. Ein Vorschlag zur Ordnung und Beschreibung von Konstruktionen. Form-Kraft-Masse 3*. K. Krämer. Stuttgart, 1992. pág. 20-31.

¹¹³ Véase OTTO, F. (ed.): *IL 22. Form: ein Vorschlag zur Entwicklung einer Methode zur Ordnung und Beschreibung von Formen. Form-Kraft-Masse 2*. K. Krämer. Stuttgart, 1988. Pág. 70.

una masa apreciable. Se pretendía, pues, llegar a encontrar un método y unos criterios que permitieran establecer un cierto orden, una referencia común, en el universo de las formas. Se incluyen por tanto no sólo los objetos creados por el hombre por medio de la técnica y el arte, sino también los objetos de la naturaleza inanimada, los de la naturaleza animada y los de la naturaleza muerta.

Este planteamiento globalizador de las formas y los objetos, presente en esta clasificación, revela como trasfondo las áreas de interés y los objetivos de las investigaciones desarrolladas en el grupo "*Biologie und Bauen*", donde encontramos, por un lado, la búsqueda de unos principios comunes entre los objetos de la naturaleza y los objetos creados por el hombre, y por otro lado una visión del hombre y de la arquitectura en concordancia con el sistema ecológico que lo rodea para formar con él una misma unidad, una parte inseparable y acorde con el todo. Es un planteamiento que contrasta con el de otros intentos de sistematización de la forma, más abstractos, más geométricos, menos orientados a la función resistente, realizados desde instituciones como la Bauhaus¹¹⁴ o el Constructivismo ruso¹¹⁵, que sentaron las bases del análisis de la forma en los actuales cursos de diseño básico¹¹⁶, y que por ello han estado más influenciados por los logros de las vanguardias artísticas del primer tercio del siglo XX.

¹¹⁴ Véanse por ejemplo los escritos pedagógicos sobre teoría de la forma de Paul Klee, recogidos en KLEE, P.: *Das bildnerische Denken*. Schwabe. Basilea, 1990 (1956).

¹¹⁵ Véanse los escritos sobre los elementos y la generación de la forma de I. G. Chernijov, recogidos y traducidos al inglés en COOK, C.: *Chernikhov. Fantasy and construction*. Architectural Design Profile 55. A.D. Volume 54. Londres, 9/10-1984.

¹¹⁶ Una muestra contemporánea de la sistematización de la forma en un curso de diseño básico nos la proporcionaría el conocido libro WONG, W.: *Fundamentos del diseño*. Gustavo Gili. Barcelona, 1997 (1993).

La clasificación de las formas que propone Frei Otto desde el contexto de los trabajos del Instituto de Estructuras Ligeras se basa en una serie de conceptos que actúan como criterios para establecer ese orden o referencia común buscados en el universo de las formas. Vamos a analizar a continuación algunos de esos conceptos básicos.

53

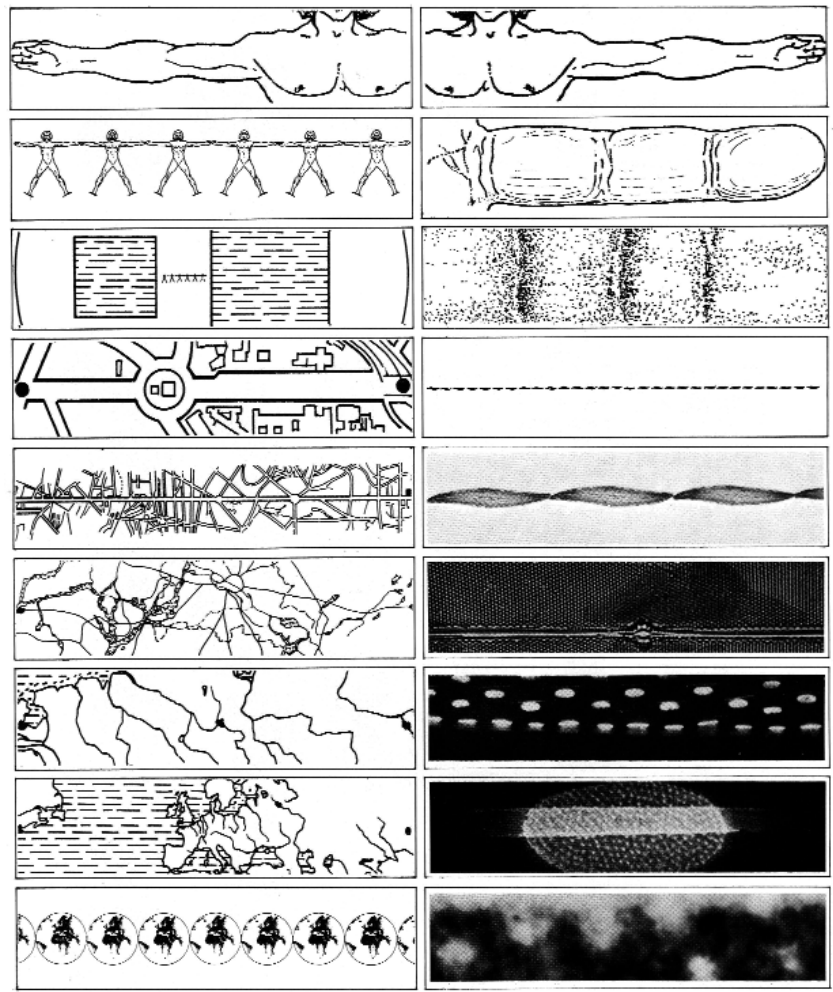


Fig. 53. Visión del macro y microcosmos en escalas progresivas variando según las potencias de diez. Fuente: IL 28. Pág. 17.

IV.1. El tamaño absoluto.

El tamaño se considera como una de las características fundamentales de la forma de un objeto. Así lo reconoce también D'Arcy Wentworth Thompson, importante biólogo, cuya obra "Sobre el crecimiento y la forma" constituye un significado precedente en el estudio de la correlación entre forma y estructura, cuando afirma que "todos nuestros conceptos de Forma deben estar referidos a términos de magnitud y de dirección. Esto es así porque la forma de un objeto sólo puede definirse cuando conocemos su magnitud, real o relativa, en varias direcciones"¹¹⁷.

Cada objeto y su correspondiente forma tienen un cierto ámbito de existencia, limitado por un tamaño mínimo absoluto y por un tamaño máximo absoluto, entre los cuales se ha encontrado ese tipo de objetos, o entre los cuales esos objetos se consideran "posibles" basándose en las leyes de la naturaleza. La conciencia de la limitación en el tamaño posible tiene su primer antecedente en Galileo cuando en su obra *Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze*, publicada en Leiden en 1638¹¹⁸, afirmaba que si intentáramos construir barcos, palacios o templos de tamaño excesivo, las vergas, vigas y pernos no podrían mantenerse unidas; tampoco puede la naturaleza hacer un árbol o un animal superior a un cierto tamaño, conservando las proporciones y

¹¹⁷ THOMPSON, D'Arcy W.: *Sobre el crecimiento y la forma*. H. Blume. Madrid, 1980 (1917). Pág. 15.

¹¹⁸ Ver traducción española: GALILEI, Galileo: *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*. Planeta-De Agostini. Barcelona, 1996.

empleando los mismos materiales que bastarían en el caso de una estructura pequeña. La construcción se haría pedazos debido a su propio peso, a menos que cambiemos sus proporciones relativas, lo que la convertirá en torpe, monstruosa e ineficaz, o encontremos nuevos materiales, más duros y fuertes que los que usamos antes.

Con respecto a la gama de tamaños posibles de todos los objetos del universo el estudio de Frei Otto subraya la importancia de un trabajo como el realizado por Philip y Phylis Morrison junto con Charles y Ray Eames, titulado *“Potencias de diez: libro que trata del tamaño relativo de los objetos del universo y del efecto que produce añadir otro cero”*¹¹⁹, y remite también a los diagramas presentados por el biólogo Johann-Gerhard Helmcke con una visión del macro- y microcosmos utilizando medios ópticos, como el microscopio electrónico, en potencias progresivas de diez¹²⁰.

¹¹⁹ Publicado en español por la editorial Labor en 1984, y basado en la película *Powers of ten*, realizada por Charles y Ray Eames, cuya primera versión data de 1968.

¹²⁰ Véase A.A.V.V.: IL 28. *Diatomeen I. Schalen in Natur und Technik*. K. Krämer. Stuttgart, 1985. Pág. 14-17.

IV.2. La forma positiva y la forma negativa. Sólidos y cavidades.

El concepto que introduce la diferenciación entre sólidos y cavidades o entre unas formas "positivas" y otras "negativas", presupone la diferenciación entre el material del objeto y el medio que lo rodea. La superficie del objeto constituye la frontera entre ambos, y determina la forma del mismo. Los objetos se diferencian de su entorno bien por encontrarse en estados físicos diferentes, como el hielo en el agua, bien por tratarse de materiales diferentes, o bien por tener una estructura o densidad diferente.

Se plantea pues como otro criterio ordenador de las formas el concepto de forma positiva, que sería la forma propia de un objeto, y su correspondiente negativo, que sería la forma negativa. La técnica de la fundición con sus modelos y sus moldes nos proporcionaría un ejemplo típico de formas positivas y negativas. Por otro lado, si un objeto está cubierto con una o quizás varias capas de material (por ejemplo pintura), estas capas mismas pueden considerarse como cuerpos de paredes delgadas cuya superficie exterior configura la forma del objeto, y cuya superficie interior es un negativo de la capa inferior.

Los objetos huecos o que contienen cavidades reciben una atención específica en la clasificación de las formas. Se contemplan las diferentes posibilidades en una transición gradual entre los objetos sin cavidades y los objetos con cavidades abiertas o cerradas (fig. 54.6) Las formas de las propias cavida-

Fig. 54. Cavidades. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 22. pág. 18 y 19.

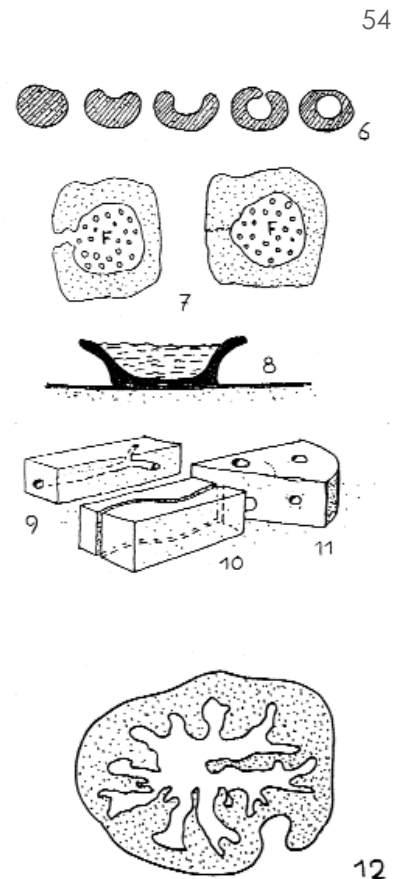
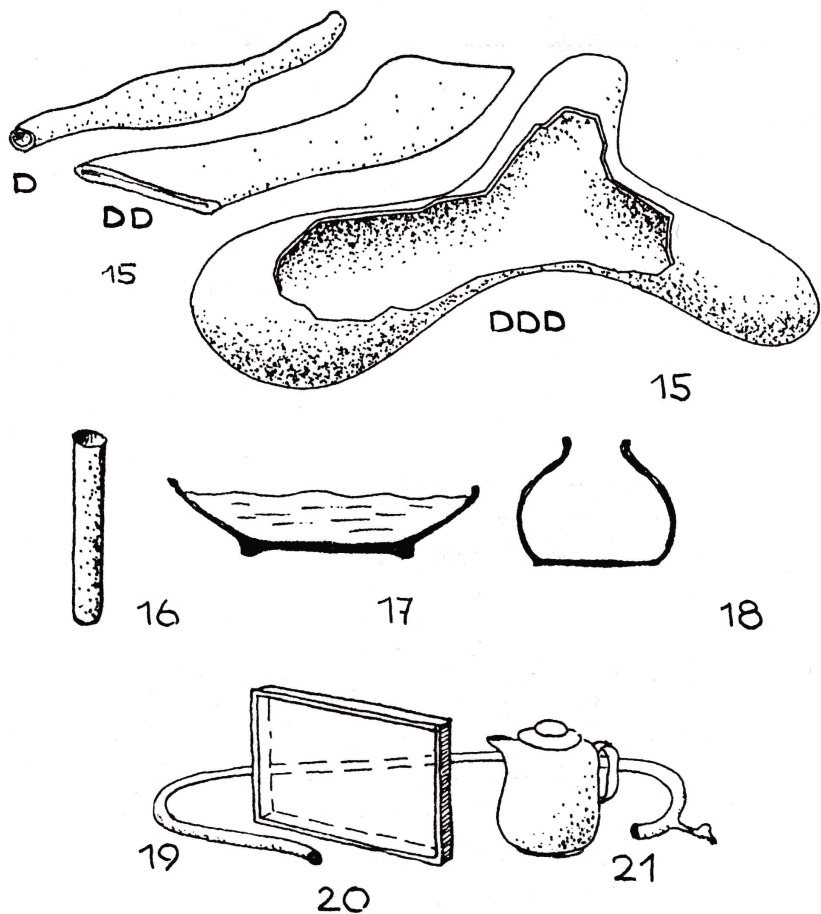


Fig. 55. Cuerpos huecos. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 22. pág. 19.

des, como formas negativas, están sujetas a las mismas condiciones que las formas positivas. Así pues las cavidades pueden ser unidimensionales (rectas, quebradas, curvadas, ramificadas, reticuladas), como por ejemplo un túnel (fig. 54.9), o bien bidimensionales (planas, quebradas, curvadas), como sería el caso de las juntas de una obra de fábrica o las fisuras de una roca (fig. 54.10), o bien tridimensionales, como por ejemplo una cueva o los agujeros de un queso Emmental (fig. 54.11)

El volumen de una cavidad en el interior de un objeto siempre es menor que el volumen del propio objeto en su conjunto, pero la superficie de una cavi-

55



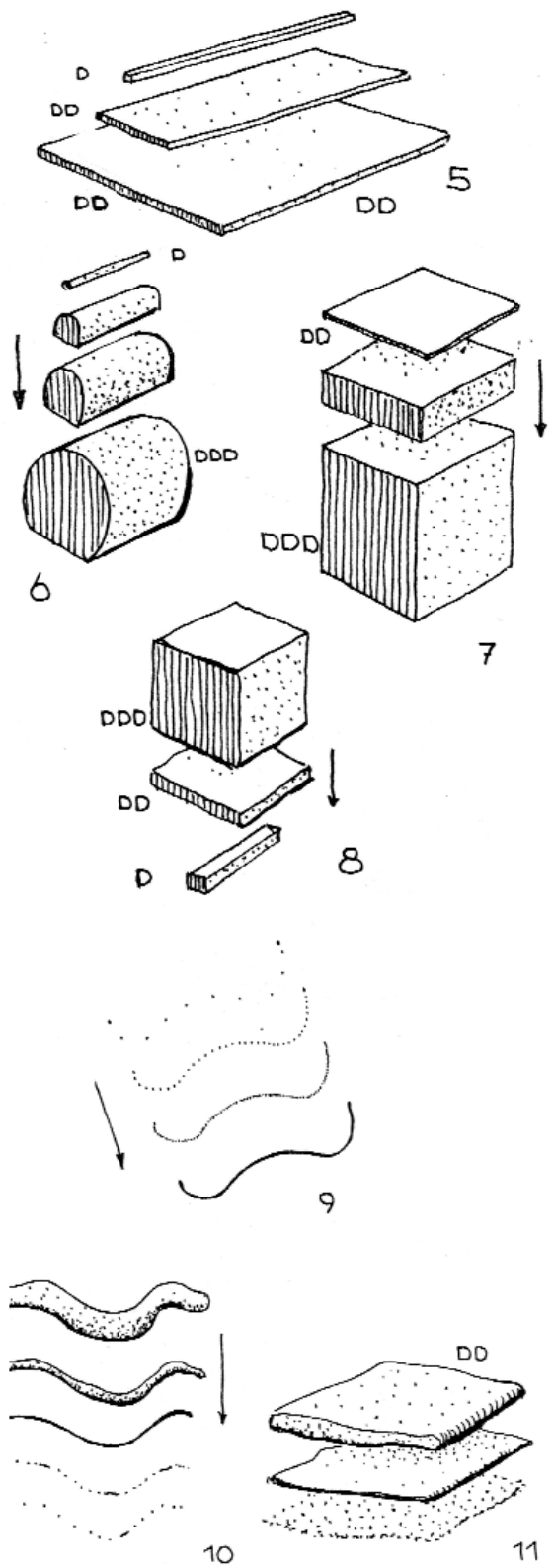
dad puede ser más grande que la superficie exterior del objeto (fig. 54.12). Hay objetos cuyas cavidades tienen una superficie unas mil veces mayor que la de la superficie exterior del objeto, como ocurre por ejemplo en los pulmones.

Si la cavidad de un objeto es muy grande con relación al objeto en su conjunto, entonces tenemos un cuerpo hueco. A medida que aumenta el tamaño de la cavidad se va aproximando su volumen al del objeto considerado en su totalidad. En un cuerpo hueco la cavidad está separada de la forma exterior por una envolvente (cáscara, piel, membrana). Si esta envolvente es uniformemente delgada, como por ejemplo la película de una burbuja de jabón, entonces la forma interior de la envolvente es la forma negativa de la superficie exterior ligeramente reducida. La envolvente de los cuerpos huecos es en la mayor parte de los casos bidimensional, aunque la forma global del cuerpo hueco sea uni-, bi- o tridimensional (fig. 55.15). Los cuerpos huecos abiertos también pueden uni-, bi- o tridimensionales. Como ejemplos de éstos estarían los tubos de ensayo, los cuencos y los jarrones (fig. 55.16-18). Ejemplos de cuerpos huecos cerrados serían los tubos, las baldosas de vidrio con cámara de aire y las teteras (fig. 55.19-21).

IV.3. Las dimensiones relativas. Las proporciones.

Las dimensiones relativas, proporciones o relaciones entre las tres dimensiones (anchura, altura y longitud), se consideran también en la clasificación de las formas de Frei Otto como una característica esencial de la forma de un objeto. Todo objeto tiene unas determinadas extensiones en cada una de las tres dimensiones. Siempre es tridimensional. Los objetos uni- y bidimensionales en el sentido estricto no existen: con una extensión tan sólo lineal o superficial no habría volumen y por tanto tampoco masa. Sin embargo se utilizan los conceptos uni- y bidimensional aplicados a objetos. El uso de esta terminología se basa en las propiedades formales características de los objetos.

Se consideran objetos unidimensionales aquéllos que son considerablemente más grandes en una dimensión que en las otras. Análogamente se consideran objetos bidimensionales aquéllos que son mucho más grandes en dos dimensiones que en la tercera. En los esquemas de la clasificación se utiliza la nomenclatura "D", "DD" y "DDD" para caracterizar a los objetos uni-, bi- y tridimensionales, respectivamente. Los dibujos que aparecen a continuación muestran algunos de los infinitos estadios intermedios que existen entre cada uno de estos tres grupos de objetos.

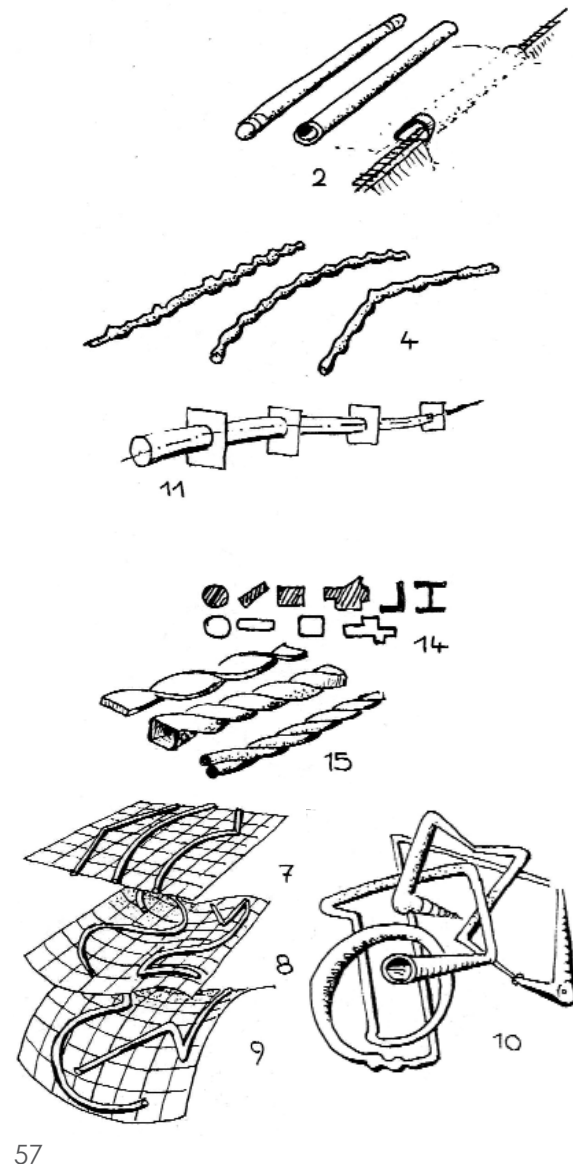


IV.4. Los objetos uni-, bi- y tridimensionales.

Los objetos unidimensionales pueden ser sólidos (p. ej. barras macizas), huecos (p. ej. tubos) o negativos (p. ej. túneles) (fig. 57.2). En los objetos unidimensionales o longitudinales la masa está concentrada alrededor de una línea central o eje, que no siempre se puede definir con claridad (podría ser la línea formada por los centros de gravedad de las secciones transversales, o cualquier otra línea de referencia que siguiera la forma del objeto). Los ejes de los objetos unidimensionales pueden ser rectos, curvados o quebrados (fig. 57.4). La curvatura o el quiebro pueden estar contenidos en un plano (fig. 57.7, p. ej. arcos de tiro o palos de hockey). Si la superficie de referencia que contiene los objetos unidimensionales está curvada en una (fig. 57.8) o dos direcciones, o bien si no hay una superficie de referencia claramente definida (fig. 57.9), entonces los objetos están curvados o quebrados en dos direcciones, o bien espacialmente curvados o quebrados (fig. 57.10, p. ej. cigüeñales o muelles helicoidales).

Por otro lado un elemento esencial para definir la forma de los objetos unidimensionales es la forma de la sección transversal a ciertos intervalos (fig. 57.11). Ésta puede ser constante a lo largo de toda la longitud del objeto. Hay una gran variedad de formas de secciones transversales (fig. 57.14), y además muchos de estos objetos de sección constante pueden retorcerse, como es el caso de pletinas, barras, cuerdas o cables (fig. 57.15).

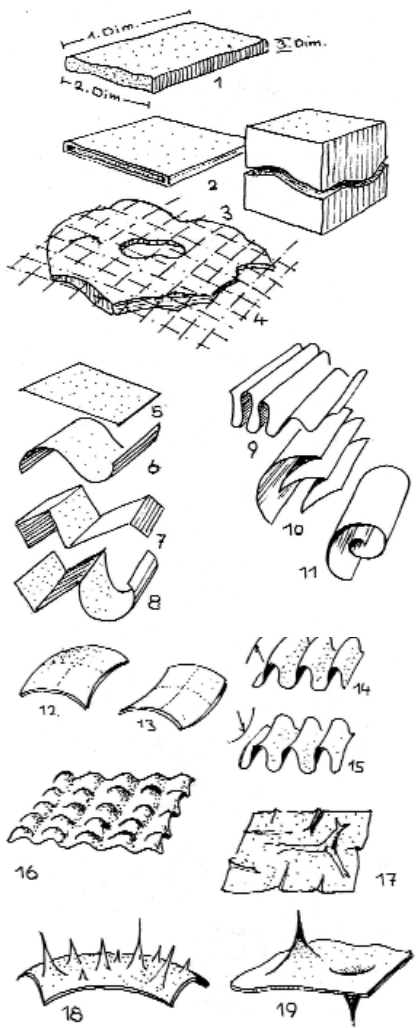
Los objetos bidimensionales también pueden ser sólidos, huecos o negativos (fig. 58.1-3). Asimismo se



57

Fig. 56. Dimensiones relativas. Proporciones. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 22. pág. 22 y 23.

Fig. 57. Objetos unidimensionales. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 22. pág. 24 y 25



puede considerar una superficie media de referencia alrededor de la cual se concentra la materia (fig. 58.4). Esa superficie media, y por tanto también los objetos bidimensionales, puede tener diferentes formas. Puede ser plana (fig. 58.5), curvada en una dirección (fig. 58.6), plegada en una dirección (fig. 58.7), o curvada y plegada en una dirección (fig. 58.8). Las superficies curvadas en una dirección pueden ser onduladas (fig. 58.9), plegadas (fig. 58.10) o enrolladas (fig. 58.11). La superficie puede tener una curvatura sinclástica en dos direcciones (forma de cúpula) (fig. 58.12) o una curvatura anticlástica en dos direcciones (forma de silla de montar) (fig. 58.13). Puede tener una ondulación sinclástica (fig. 58.14) o una ondulación anticlástica (fig. 58.15). La curvatura ondulante también puede discurrir en ambas direcciones (fig. 58.16).

También se contempla la posibilidad de que en esa superficie aparezcan pliegues (fig. 58.17), o bien puntas en una sola cara (fig. 58.18) o en ambas caras, formando en la cara opuesta depresiones (fig. 58.19). Las superficies se pueden superponer en varias capas o bien enrollarse, formando así objetos unidimensionales (fig. 59.20) y tridimensionales (fig. 59.21), y también cuerpos huecos (fig. 59.22).

58

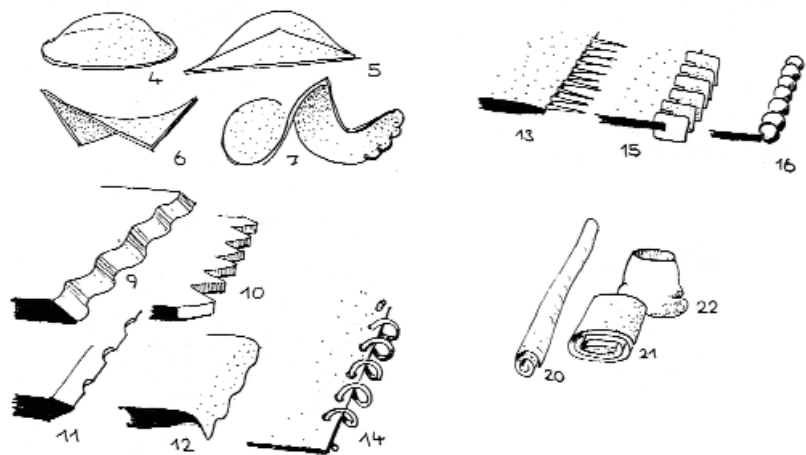


Fig. 58. Objetos bidimensionales. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 22 pág. 26

Fig. 59. El borde de los objetos bidimensionales (4-16). Superficies formando objetos unidimensionales, tridimensionales y cuerpos huecos (20-22). Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 22 pág. 27 y 28

59

lado el borde se considera un elemento fundamental de los objetos bidimensionales. La forma del borde tiene una influencia decisiva en la forma de los objetos bidimensionales. Las imágenes (fig. 59.4-16) dan alguna muestra de la enorme variabilidad de la forma de los bordes.

En los objetos tridimensionales se da cuenta de la más variada gama de posibilidades en la transición entre formas positivas, negativas y huecas, así como en la transición hacia la forma tridimensional a partir de elementos exclusivamente uni-, bi- o tridimensionales (fig. 60. 19 y 20).

También es posible ir vaciando progresivamente un objeto hasta que se transforma en un delgado esqueleto compuesto por partes o elementos bi- o unidimensionales (fig. 61.21). La máxima reducción de la densidad de un objeto tridimensional es la agrupación de puntos (fig. 61.22), como por ejemplo en una nube de polvo, ya casi sin contenido material.

La gran variedad de formas que se pueden ver en la naturaleza, entre otras causas, ha hecho que el hombre, desde muy antiguo, recurriera a las analogías geométricas para fines descriptivos. Así podemos encontrar la esfera, el elipsoide, el cilindro, el prisma, el cono, la pirámide o el hiperboloide (fig. 62).

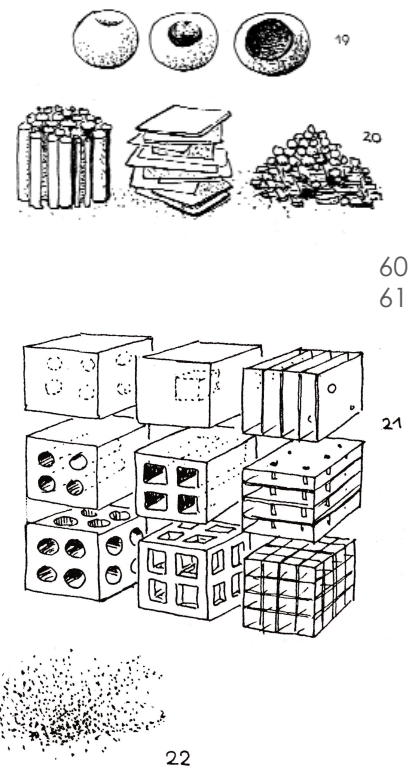
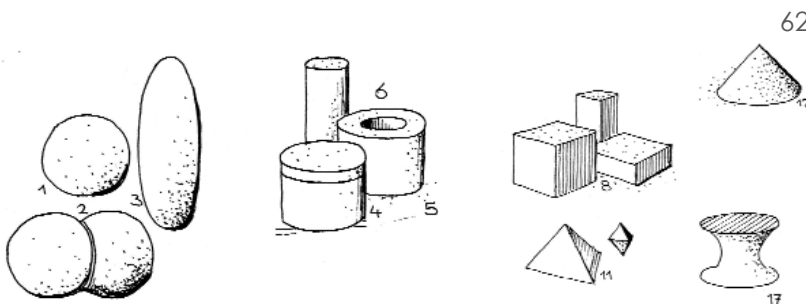


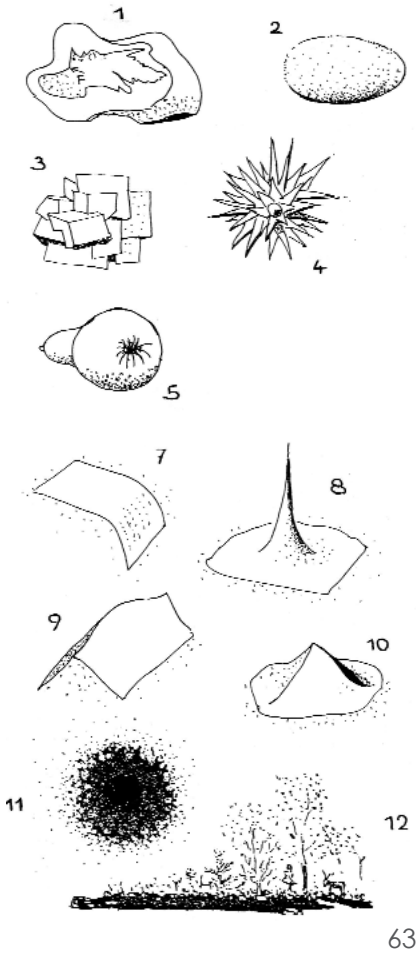
Fig. 60. Objetos tridimensionales. Transiciones hacia formas huecas y hacia formas tridimensionales compuestas por elementos uni-, bi- o tridimensionales. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 22 pág. 29

Fig. 61. Perforaciones graduales de objetos tridimensionales formando transiciones hacia objetos compuestos por partes o elementos uni- o bidimensionales (21). Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 22 pág. 29

Fig. 62. Formas geométricas tridimensionales. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 22 pág. 30



IV.5. La superficie.



Los objetos tridimensionales vienen determinados en lo esencial por la forma de su superficie. La forma de la superficie tiene una influencia decisiva en la forma del objeto en su totalidad. La superficie es el límite del objeto. De hecho, todos los objetos, independientemente de si son uni-, bi- o tridimensionales, tienen una superficie. Los objetos que contienen cavidades tienen varias superficies independientes.

La superficie de un objeto es, en la mayor parte de los casos, una combinación de elementos de superficie: superficies (fig. 63.7), puntas (fig. 63.8), bordes (fig. 63.9) y esquinas (fig. 63.10). El concepto de textura por otra parte cobra también una gran importancia, a una escala más próxima, con relación a la descripción de superficies. No todas las superficies son definibles en la misma medida a partir de estos elementos de superficie. Por ejemplo la atmósfera de la tierra, que no tiene un límite claro con el espacio, es muy difícil o imposible de definir. También lo son las nubes, o la superficie de un bosque (fig. 63.11 y 12). Para la descripción de la forma de estos objetos la geometría fractal tiene un papel decisivo.

Fig. 63. Diferentes tipos (1-5) y elementos de superficie (7-10). Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 31

Fig. 64. Monoedros. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 22 pág. 42

IV.6. Mono-, di- y poliedros.

Hemos visto en el apartado anterior cómo para el análisis de las superficies se definen los elementos de superficie (superficies, puntas, bordes y esquinas). El número y la forma de estos elementos se considera una característica esencial, y por ello la clasificación se detiene en las diferentes posibilidades de mono- y poliedros.

Los monoedros son objetos envueltos por una superficie única y continua, sin ningún elemento que la divida totalmente en diferentes partes. Pueden ser uni-, bi- o tridimensionales, positivos, negativos o huecos (fig. 64.1-4). La esfera, el elipsoide, el toro y el huevo de pájaro son algunos de los más conocidos ejemplos. Esta superficie única que envuelve los monoedros puede ser

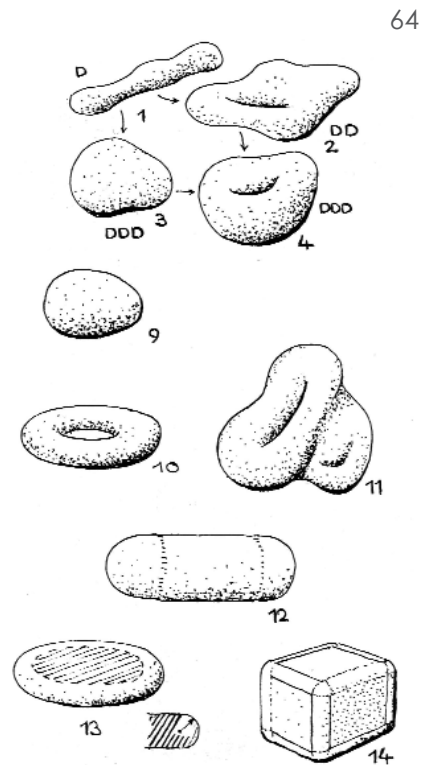
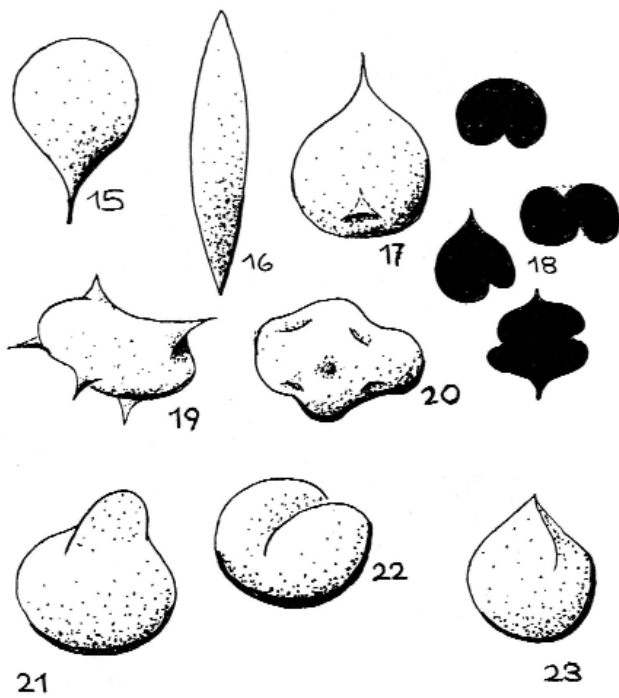


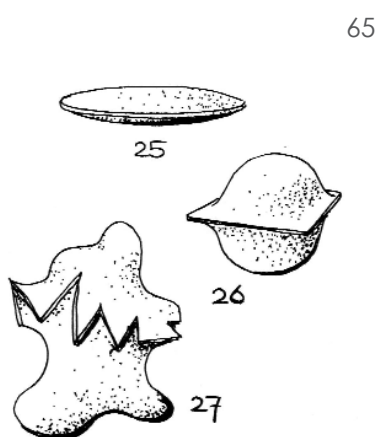
Fig. 65. Diedros. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 22 pág. 43

Fig. 66. Poliedros. Dibujos procedentes de diferentes autores y publicaciones. Fuente: IL 22 pág. 43 y 44

el resultado de la transición entre diferentes tipos de superficies, como por ejemplo, en el caso del toro, entre una superficie sinclástica exterior y una superficie anti-clástica interior. Esta transición es continua. En los monoedros a menudo se presentan discontinuidades. Por ejemplo cuando una superficie plana se encuentra una curva (fig. 64.13 y 14), sin formar un borde o arista, o cuando una superficie de curvatura única se encuentra con otra superficie de doble curvatura (fig. 64.12).

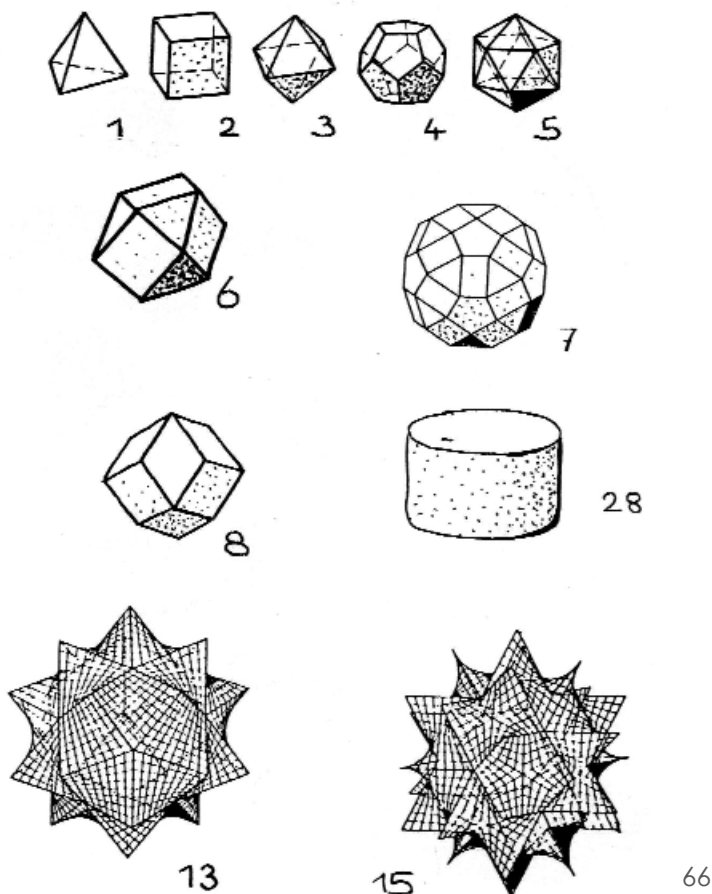
En los monoedros también pueden presentarse puntas o depresiones, bordes o valles, y esquinas, siempre que estos elementos en ningún momento rodeen completamente la superficie (fig. 64.15-23). Ejemplos de este tipo de monoedros serían un globo (fig. 64.15), un huso (fig. 64.16), y muchas frutas, que con frecuencia se presentan con una punta y una depresión (fig. 64.17) o con dos depresiones, como en el caso del tomate o la manzana.

En los diedros tenemos dos elementos de superficie separados por un borde o un valle, como sería el caso de un disco (fig. 65.25). La línea divisoria del borde o valle puede adoptar formas muy diferentes (fig. 65.26 y 27).



La clasificación de las formas según el número y la forma de las superficies y de los bordes o aristas permite la descripción y la producción de formas muy variadas. La conciencia de la existencia de un orden que rige la geometría de los poliedros ha impulsado muchos estudios e investigaciones con el propósito de ir desvelando cada vez en mayor medida ese orden¹²¹, y de poder utilizarlo como punto de partida para la búsqueda de nuevas posibilidades de diseño.

Con relación a los poliedros la clasificación señala el cilindro, la pirámide formada por cuatro triángulos equiláteros y el cubo como el triedro, el tetraedro y el hexaedro más conocidos, respectivamente. Se mencionan también los cinco poliedros regulares, cuyas caras están formadas por polígonos regulares de un solo tipo, con superficies planas y aristas rectas, así como los poliedros semirregulares, cuyas caras están formadas por un polígono irregular o por varios polígonos regulares. Finalmente se mencionan los poliedros semirregulares con caras curvadas, y por último los poliedros irregulares.

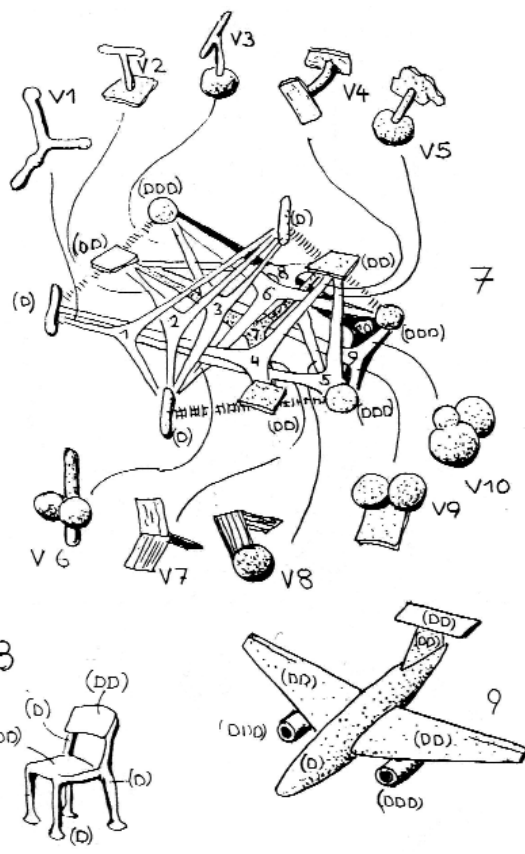


¹²¹ Como muestra de estas investigaciones cabría mencionar dos obras fundamentales: BURT, M.: *The Periodic Table of the Polyhedral Universe*. Technion. Haifa, 1996, y CRITCHLOW, K.: *Order in space. A design source book*. Thames & Hudson. Londres, 1973.

IV.7. Las formas compuestas. Partes y elementos.

Cualquier objeto uni-, bi- o tridimensional se puede combinar con otro objeto, al igual que cualquier objeto puede estar formado por partes uni-, bi- o tridimensionales. Todas las llamadas "partes" pertenecen aproximadamente al mismo orden de magnitud. Muchos objetos se componen de partes que tienen formas diferentes. Un gran número de objetos se pueden analizar aproximada, aunque adecuadamente, según su forma global y según la forma y el número de las partes que lo componen. Para facilitar en los esquemas la diferenciación entre objetos y partes, éstas se señalan mediante el uso de los paréntesis. D, DD, DDD es la nomenclatura que identifica la dimensión de los objetos, mientras que (D), (DD), (DDD) identifica la dimensión de las partes.

67



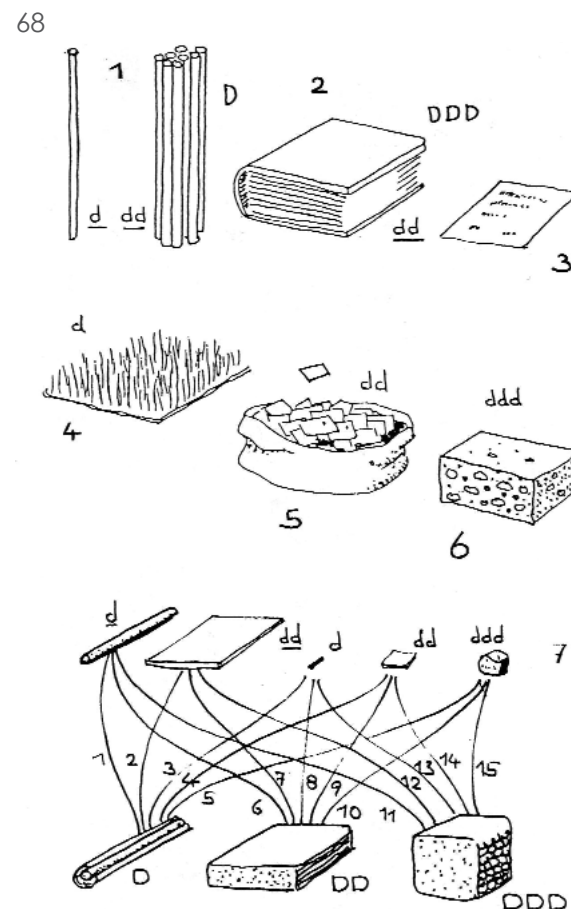
Hay un gran número de combinaciones posibles. Si los objetos se componen sólo de dos partes hay seis combinaciones; si se componen de tres partes hay diez combinaciones, tal como ilustra esquemáticamente la figura 67.7. La silla de la figura 67.8 se compone de cuatro partes unidimensionales y dos bidimensionales, mientras que el avión de la figura 67.9 se compone de una parte unidimensional, cuatro bidimensionales y dos tridimensionales. Es interesante hacer notar aquí el papel que juegan los aspectos formales en la diferenciación de objetos dentro del campo de la biología, como por ejemplo el número de las extremidades.

Los objetos también pueden consistir en un gran número de partes pequeñas. A estos pequeños componentes en la clasificación se les denomina "elementos". Mientras las llamadas "partes" de los objetos pertenecen al mismo orden de magnitud que los objetos mismos, los "elementos" son considerablemente más pequeños. Por regla general éstos tienen menos masa, menos peso y menores dimensiones. Muy frecuentemente pertenecen a otro orden de magnitud, a otra escala. Existen también "grandes elementos". Son aquéllos que en una o dos dimensiones son tan grandes como el objeto mismo. En la clasificación la nomenclatura que identifica a unos y otros es la siguiente: d, dd corresponde a los "grandes elementos" uni- y bidimensionales, respectivamente, mientras que d, dd, ddd corresponde a los "elementos" uni-, bi- y tridimensionales, respectivamente.

En la imagen siguiente podemos encontrar varios ejemplos. La figura 68.1 muestra un "gran elemento" unidimensional, d, que podría ser una vara que forma parte de un manojo de varas. La figura 68.3 muestra una página como un "gran elemento" bidimensional, dd, con dos dimensiones del mismo tamaño que el objeto al que pertenece, que es un libro. Ejemplos de elementos unidimensionales, d, serían los pelos de una alfombra de terciopelo (fig. 68.4); de elementos bidimensionales, dd, las cartas de una saca de correos (fig. 68.5); y de elementos tridimensionales, ddd, los ladrillos de un muro (fig. 68.6). "Grandes elementos" uni- y bidimensionales y "elementos" uni-, bi- y tridimensionales pueden formar parte de objetos uni-, bi- y tridimensionales. Si sólo aparece un solo tipo de componente hay 15 combinaciones posibles (fig. 68.7).

Fig. 67. Combinaciones de tres partes (7). Ejemplos de formas compuestas (8, 9). Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 26

Fig. 68. Formas compuestas por elementos (1-6). Combinaciones con un tipo de elemento (7). Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 27



IV.8. La génesis de la forma y los mundos de formas.

En la clasificación de las formas de Frei Otto la conciencia de que todo objeto está caracterizado por su proceso de formación es bien patente. Es el reflejo de un especial interés por el proceso de generación de la forma, tal como lo demuestra el hecho de que uno de los proyectos parciales del Programa específico de investigación 230 "Estructuras naturales", auspiciado por el gobierno alemán, se haya centrado en el tema de los "Procesos de formación de objetos en la naturaleza y en la técnica"¹²². F. Otto señala en la clasificación tres grandes procesos de generación de la forma, históricamente consecutivos:

1. El proceso de generación abiótico, que corresponde al mundo de las formas de la naturaleza inanimada. Ejemplos serían los astros, las estrellas, las montañas, las rocas, el agua, los cristales, las moléculas, los átomos, etc.
2. El proceso de generación biótico, que caracteriza al mundo de las formas de la naturaleza animada. Ejemplos serían los organismos uni- y pluricelulares, las plantas, los animales, etc.
3. La actividad humana, que conduce a la formación de los objetos inanimados de la técnica y del arte. Ejemplos podrían ser las casas, la ropa, las armas, las máquinas, los libros, las obras de arte, etc.

¹²² Una publicación de F. Otto dedicada monográficamente al tema es OTTO, F.: *Gestaltwerdung : zur Formentstehung in Natur, Technik und Baukunst / Frei Otto*. Muller. Colonia, 1988.

Además se señalan también otros grupos de formas que constituirían estadios intermedios o fases de transición:

- Las formas de la naturaleza muerta, que originariamente pertenecían a la naturaleza animada, y que estaban caracterizadas por ella.
- Las formas de la naturaleza inanimada que se ven afectadas por la naturaleza viviente.
- Las formas de la técnica de los animales.
- Las formas de la naturaleza animada que se ven afectadas por el hombre.

Esta visión de conjunto que intenta abarcar todo el universo de las formas con sus procesos de generación la sintetiza gráficamente Frei Otto en los diagramas que se muestran a continuación (fig. 69, 70, 71). Son imágenes que reflejan un interés por conseguir la integración del hombre en el sistema ecológico que lo rodea para formar una misma unidad. Como trasfondo aparece el objetivo de conseguir que las casas y ciudades junto con las plantas y animales formen un biotopo natural, es decir, que la casa no se dirija contra la naturaleza, sino que al contrario el hombre y su técnica sean una parte inseparable de ella, una parte acorde con el todo¹²³. Esa intención de incluir en la clasificación de las formas otros objetos no producidos por el hombre, es decir, de abarcar el ámbito más amplio posible de todos los objetos materiales, está en consonancia con las investigaciones del Instituto de Estructuras Ligeras mediante las cuales se intenta utilizar la observación de los procesos de generación de los objetos para reconocer el todo, es decir, la coexistencia e interdependencia de muchos objetos.

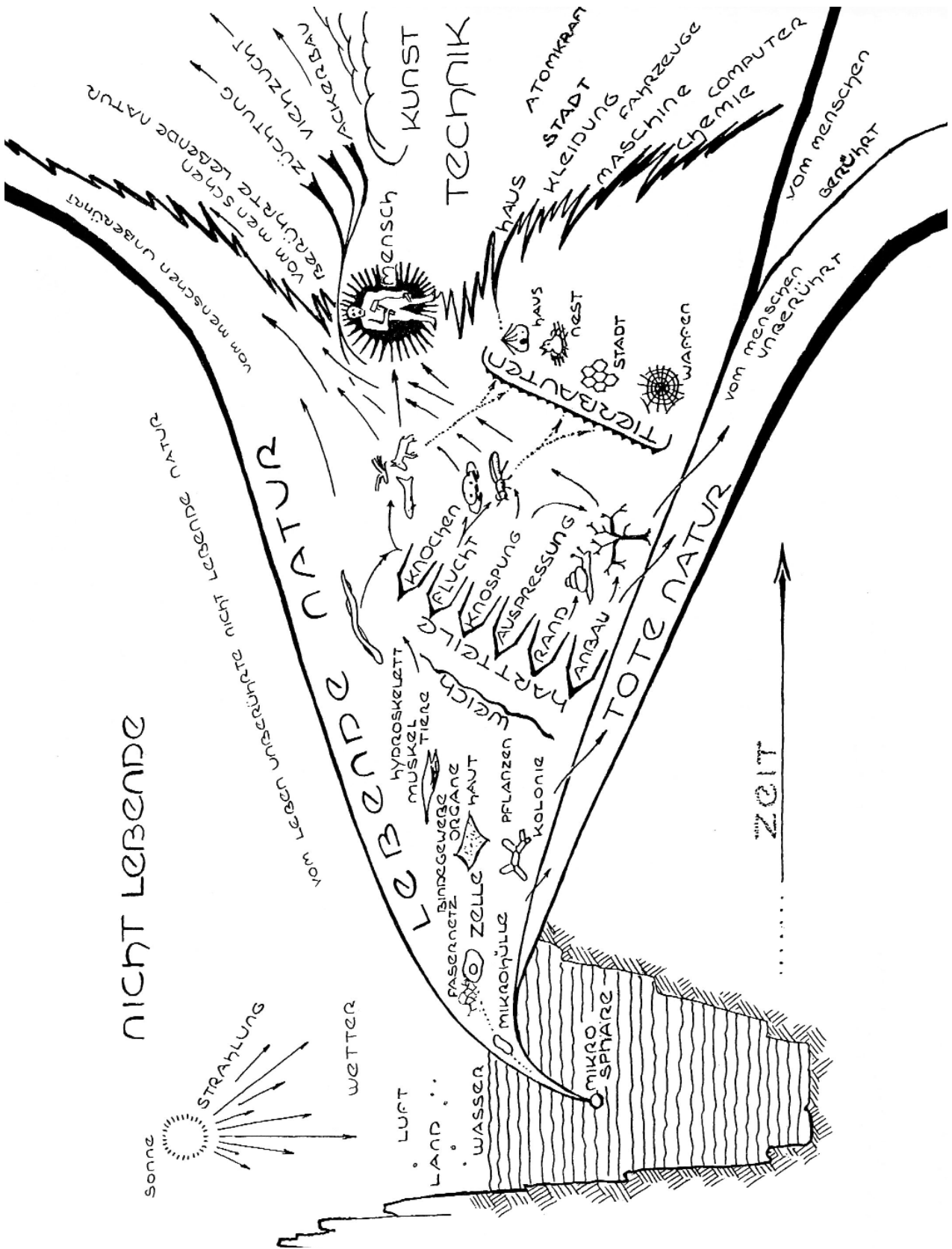
(páginas siguientes)

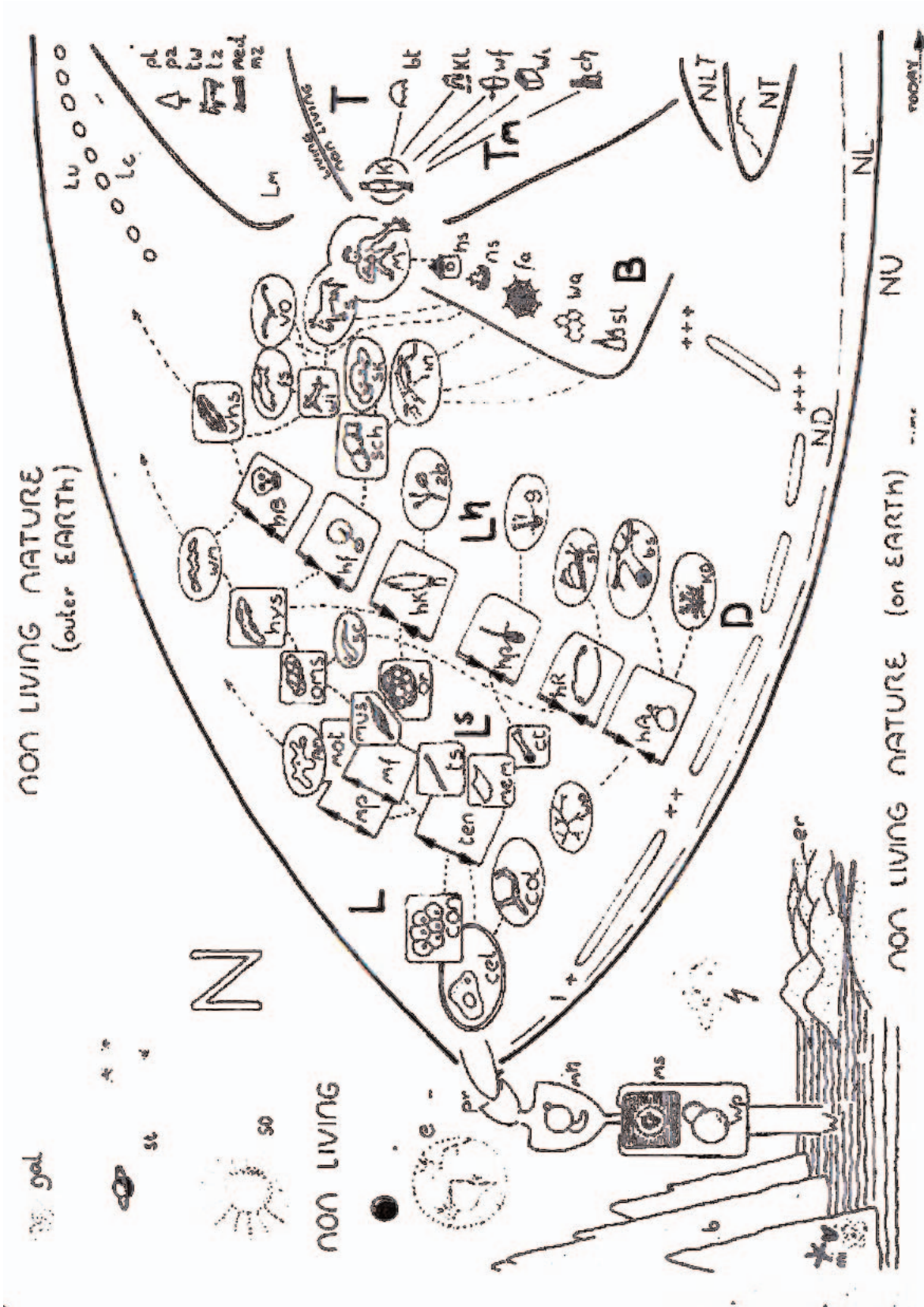
Fig. 69. Sinopsis evolutiva de la génesis de la forma a lo largo del tiempo, y de los diferentes mundos o grupos de formas: naturaleza inanimada, naturaleza animada, objetos inanimados de la técnica y el arte, naturaleza muerta, etc. Dibujo de Frei Otto. Fuente: IL 22 pág. 66.

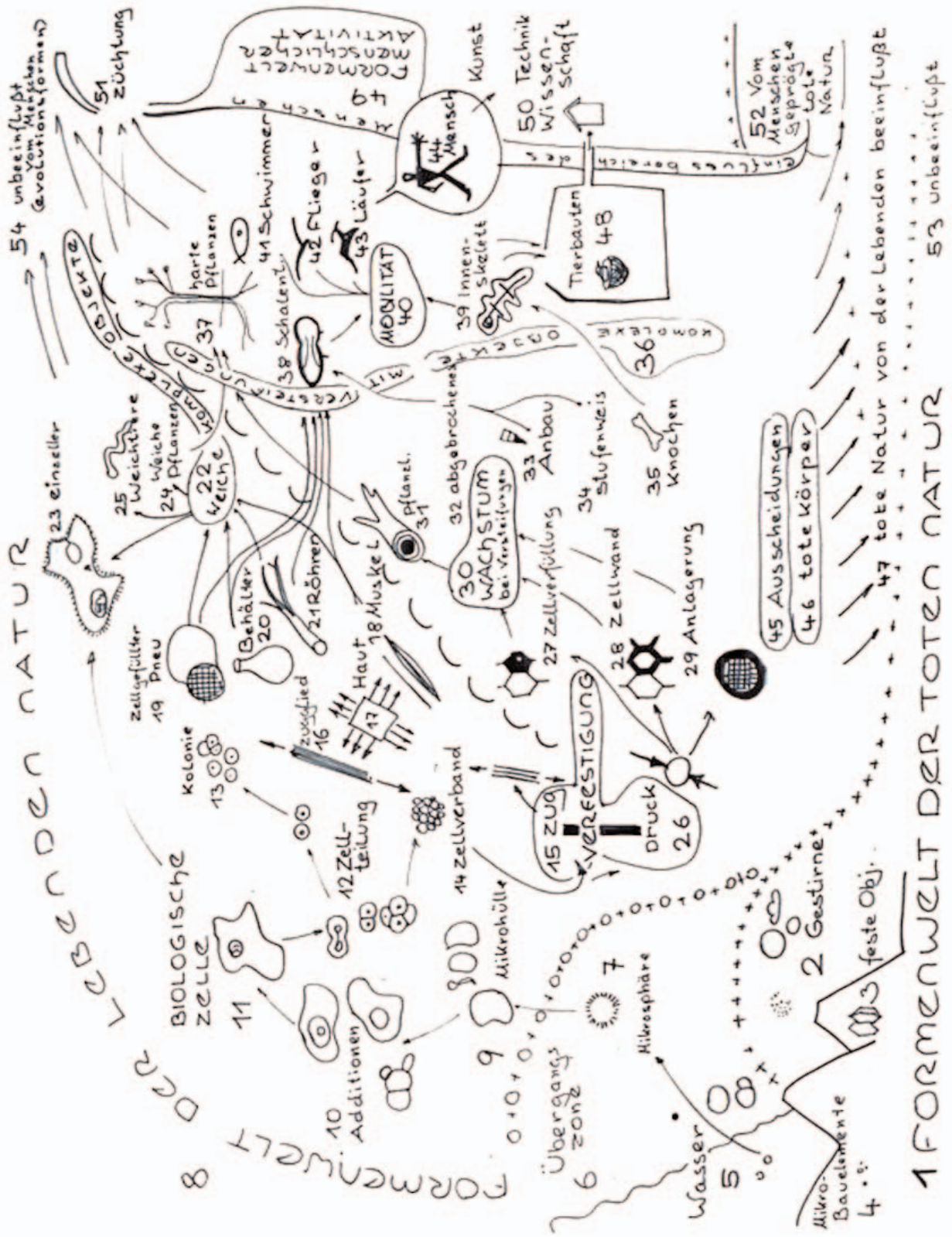
Fig. 70. Sinopsis evolutiva de la génesis de la forma a lo largo del tiempo, y de los diferentes mundos o grupos de formas. Dibujo de Frei Otto. Fuente: Archivo IL. Diapositiva N° 2.63.195.

Fig. 71. Síntesis gráfica del universo de las formas y sus procesos de generación. Dibujo de Frei Otto. Fuente: Archivo IL. Diap. N° 2.63.194.

¹²³ Este tema aparece con frecuencia en los escritos de Frei Otto. Uno de los lugares donde ha sido más extensamente desarrollado es en el capítulo titulado "Das Ganze. Natürlich Bauen" (El todo. La construcción natural) de la obra A.A.V.V.: *Natürliche Konstruktionen*.







IV.9. Variabilidad y movilidad de las formas.

La voluntad de establecer un orden de referencia lo más amplio posible en el mundo de las formas obliga a tomar también en consideración el cambio y el movimiento. En sentido estricto no existen objetos que no cambien de forma o que no se muevan, pero la clasificación de las formas de Frei Otto establece una distinción entre objetos que cambian rápidamente su forma o su ubicación, y objetos cuya forma y ubicación tan sólo muy lentamente o apenas cambian. Desde el punto de vista del hombre, las montañas, por ejemplo, no cambian, aunque la erosión y los movimientos de la corteza terrestre cambian la forma de estas montañas en un proceso lento pero continuo. El hombre considera la superficie del mar en permanente cambio, mientras que un avión se muestra como un objeto móvil aunque no cambiante, y una hoja de papel en el aire aparece como un objeto móvil que al mismo tiempo está cambiando su forma.

En la naturaleza inanimada los objetos cambian por un gran número de procesos tales como el movimiento de las estrellas, las evoluciones de las nubes, el oleaje, las diferentes formas de la erosión, la erupción de volcanes, las combinaciones y divisiones de los compuestos, moléculas y átomos. Los objetos inanimados pueden renovarse mediante el cambio. Envejecen sobre todo por la acción de la intemperie y la desintegración, pero a pesar de ello no mueren.

Los objetos de la naturaleza animada tienen su origen en la división y en la procreación. Crecen, maduran, envejecen y mueren. Se convierten en cuerpos

muerdos. Cada individuo experimenta este proceso, que se ve interrumpido con la muerte en diferentes momentos a lo largo de la vida. Aparte del proceso de cambio de cada individuo cabe mencionar los largos procesos de desarrollo de las especies, que a partir de la simple microesfera y la célula original, han producido hasta ahora más de 40 millones de especies. En cuanto a las formas de movimiento de la naturaleza animada, el tipo y velocidad de locomoción y el medio en el que el desplazamiento tiene lugar, ejercen una influencia fundamental en las formas de algunas plantas y partes de las plantas (por ejemplo semillas) y animales (desplazamiento por reptación, carrera, natación o vuelo). Aparte de la locomoción hay otras formas de movimiento en la naturaleza animada que caracterizan sus formas, como la trepa, la flotación en el agua o en el aire o los movimientos de asimiento o apresamiento.

Entre los objetos de la técnica no sólo existen los que están concebidos para ser invariables y estáticos, sino también otros de corta existencia y móviles, tales como los proyectiles o las formas de las explosiones. La vivienda humana es en general estática e inmóvil (pertenece al ámbito "inmobiliario"), aunque algunas de las viviendas más primitivas como la tienda o la yurta son móviles y es posible llevarlas consigo. La forma de los edificios "móviles" es diferente a la de los "inmóviles". La invención más importante de entre las que afectan al movimiento de los objetos fue el rodillo y la rueda, que no sólo han dado lugar a los vehículos sino también a las hélices, poleas elevadoras, rodamientos, etc. Las propias trayectorias de los vehículos también se incluyen en la clasificación como otras formas de movimiento: los coches y sus huellas en la arena, los barcos y su estela en el mar, las trayectorias de balones, proyectiles y cohetes.

V. Frei Otto y la sistematización de la estructura

La estructura. Propuestas de clasificación y descripción.

Es evidente que la aportación de Frei Otto a la arquitectura ha sido de una gran riqueza y originalidad, habiendo creado nuevos sistemas estructurales y desarrollado y perfeccionado otros ya conocidos. Sin embargo, llama la atención descubrir cómo el intento de clasificar y ordenar los sistemas estructurales ha sido uno de los temas de interés que han estado presentes desde los inicios de su actividad como arquitecto.

La búsqueda de una clasificación que sistematice y ordene el mundo de las estructuras y lo ponga en relación con el universo de las formas constituye una aspiración de larga tradición entre los arquitectos a la que se enfrenta cada generación, aun siendo conscientes de la imposibilidad de conseguir una sistematización definitiva. Es un tema que se presenta siempre nuevo, y cada intento que se realiza plantea el reto de incorporar los sistemas y las realizaciones más recientes, así como el de afinar en el uso de los criterios ordenadores para intentar abarcar el mayor número de posibilidades.

Frei Otto señala el inicio de sus trabajos sobre el tema de la clasificación de estructuras en 1958 con la realización de un seminario en la *Washington University* de St. Louis (Estados Unidos)¹²⁴. Este seminario se hizo necesario porque Frei Otto observó que en el área de teoría de las estructuras los estudiantes de

¹²⁴ Véase OTTO, Frei: *IL 23 Konstruktion Structure*. K. Krämer. Stuttgart, 1992. Pág. 8-9.

arquitectura americanos tenían una formación muy diferente de la de los europeos. En efecto, él observó que los estudiantes americanos a menudo consideraban las estructuras como medio para la expresión artística, y raramente apreciaban las leyes inherentes a las mismas, que son requisito previo para reconocer las formas características y propias de las estructuras. Él buscó pues un método que pudiera mostrar los principios de la génesis de la forma y de los procesos de autoformación, así como las características físicas de los objetos con una marcada capacidad para la transmisión de fuerzas.

Continuó desarrollando este método en 1960 en la *Yale University* y en 1962 en la *University of California*, el *M.I.T.* y la *Harvard University*. En un seminario llevado a cabo en la *Technische Universität Berlin* sobre el tema de las "estructuras ligeras en la naturaleza y en la arquitectura" se llegó a una sinopsis, sugerida por el biólogo J.-G. Helmcke. Con la fundación del Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart en el año 1964, el tema se convirtió en una de las áreas fundamentales del trabajo del instituto, ya dentro del tema general "Forma, fuerza, masa", en el que se investigan las relaciones entre forma y estructura, para llegar a la formulación del "principio de la construcción ligera".

V.1. Clasificación de 1963 / 1964.

Esta clasificación fue publicada en 1963 en la revista *Bauwelt* en un artículo de Frei Otto titulado "*Grundbegriffe der Konstruktionen*" (Conceptos básicos de las estructuras)¹²⁵, así como en 1966, en el segundo tomo del libro *Zugbeanspruchte Konstruktionen* (Estructuras traccionadas)¹²⁶.

Esta ordenación sería comparable a la tabla periódica de los elementos, aunque, como se indicaba anteriormente, la pretensión no es la de crear un esquema cerrado o definitivo, sino más bien una base de partida que admite todo tipo de modificaciones y alteraciones, y que por otro lado es rica en sugerencias para imaginar nuevas posibilidades en los tipos estructurales.

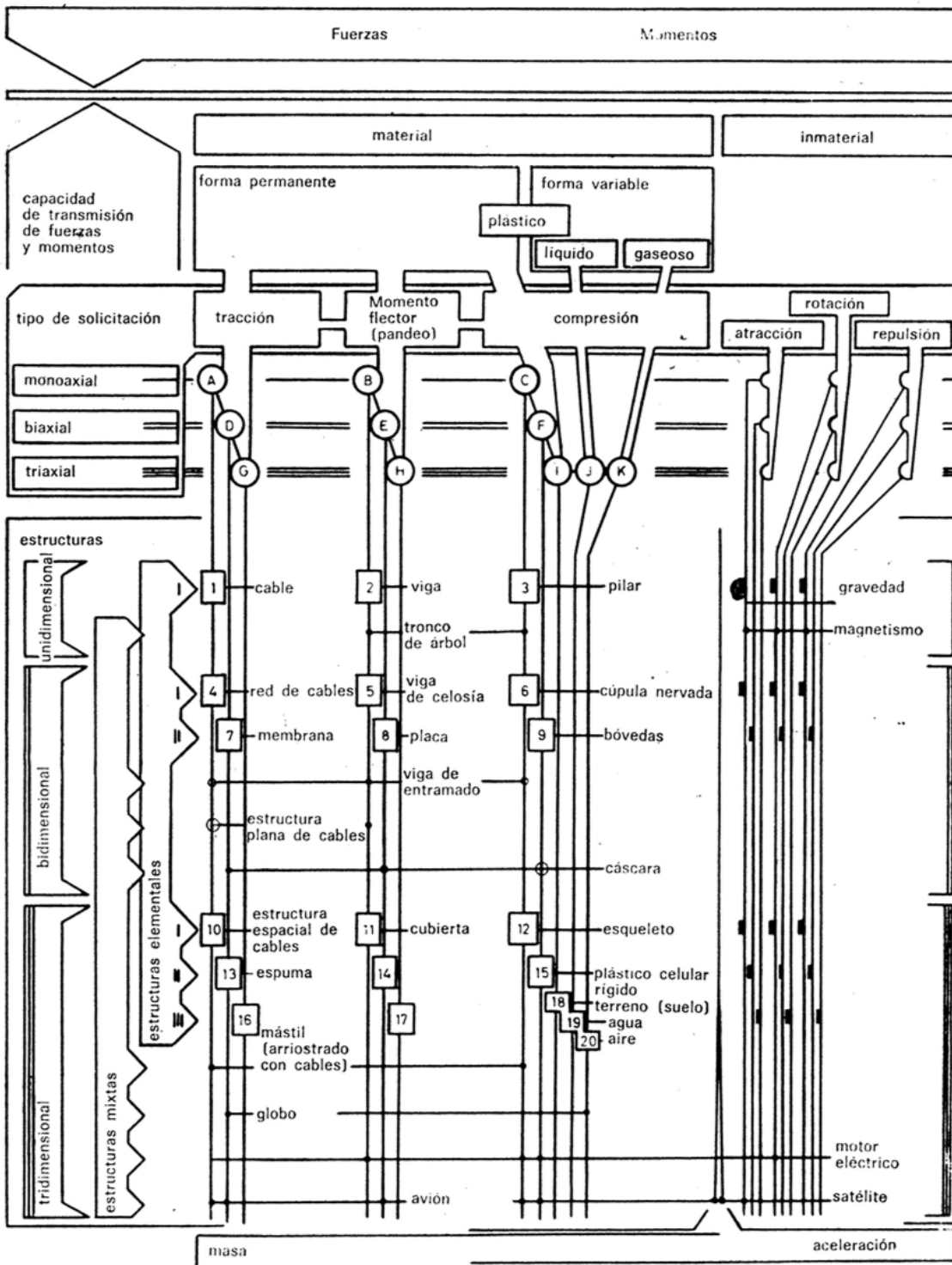
En esta clasificación Frei Otto concibe las estructuras como el medio para la transmisión de las fuerzas y de los momentos. Por ello se incluyen en ella no sólo las estructuras técnicas, sino también las estructuras vivientes, así como todas las capacidades observadas en los objetos inanimados para transmitir fuerzas y momentos.

Se establece también la diferenciación entre estructuras materiales y estructuras inmateriales, contemplando así la posibilidad de transmitir fuerzas y momentos sin utilizar materia, como sería el caso, por ejemplo, de los campos magnéticos.

¹²⁵ OTTO, Frei: "*Grundbegriffe der Konstruktionen*", en *Bauwelt* 54 (1963) nº 44-45. Pág. 1302-1304.

¹²⁶ OTTO, Frei; SCHLEYER, Friedrich-Karl: *Zugbeanspruchte Konstruktionen II*. Ullstein Verlag, Frankfurt am Main, 1966. Hay traducción al inglés: idem: *Tensile structures vol. II*. MIT Press. Cambridge / London, 1969. Pág. 10-14.

Fig. 72 Clasificación de estructuras elaborada por Frei Otto entre 1963 y 1964. Fuente: ROLAND, C.: *Frei Otto: Estructuras*. GG. 1973. pág. 2



También se incluyen en la clasificación los materiales que no tienen forma estable, como los líquidos, los gaseosos, los viscosos o los plásticos, ya que también van asumiendo un papel resistente en sistemas estructurales recientes, como por ejemplo en las estructuras neumáticas.

Los sistemas estructurales están pues ordenados en esta clasificación según los siguientes criterios:

1. Según la dimensión espacial predominante; así según predomine una, dos o tres dimensiones sobre las otras, se clasifican en:
 - a) Estructuras lineales o unidimensionales (cables, apoyos y vigas).
 - b) Estructuras planas o bidimensionales (placas, cáscaras y membranas).
 - c) Estructuras espaciales o tridimensionales (mallas espaciales tanto de barras como de cables).
2. Según la sollicitación a que estén sometidos (tracción, compresión y momentos flectores o bien atracción, rotación y repulsión en el campo inmaterial).
3. Según la dirección de la sollicitación (en mono- bi- y triaxial).
4. Según el estado de la materia del sistema estructural (en el campo material se podrá clasificar en sólido, plástico, líquido y gaseoso; la clasificación también se puede extender al campo inmaterial).

En la clasificación se señalan y se diferencian las llamadas estructuras elementales, o estructuras sometidas a un solo tipo de sollicitación, y las llamadas estructuras mixtas, o estructuras sometidas simultáneamente a varios tipos de sollicitaciones.

Ejemplos de estructuras básicas unidimensionales serían un cable extendido (ver en la clasificación la casilla 1), una viga sometida a flexión (ver casilla 2), y un pilar sometido a compresión (casilla 3). Sin embargo, un tronco de árbol que soporta el peso de todo el árbol, y que también transmite momentos causados por el viento como sollicitaciones de flexión, debe considerarse como una estructura mixta unidimensional.

Ejemplos de estructuras básicas bidimensionales compuestas por elementos lineales sometidos a sollicitación monoaxial serían una red de cables (casilla 4), una viga de celosía (casilla 5), y una cúpula geodésica (casilla 6). Por otro lado encontraríamos ejemplos de estructuras básicas bidimensionales sometidas a sollicitación biaxial en las membranas (casilla 7), las placas o losas (casilla 8) y las bóvedas (casilla 9). La viga plana de celosía o entramado con nudos flexibles se podría considerar como una estructura mixta bidimensional compuesta por elementos lineales sometidos a sollicitación monoaxial de tracción en unas barras y de compresión en otras.

Se trata pues de una clasificación que intenta incorporar en su organización algunos criterios generalmente no utilizados en clasificaciones ante-

riores, y por lo tanto con el valor añadido de incluir no sólo las estructuras realizadas hasta ese momento, sino también otras posibilidades, que si bien pueden considerarse hoy todavía dentro del campo de lo teórico, pueden constituir una propuesta de una gran capacidad sugerente para desarrollar nuevos sistemas estructurales.

V.2. Clasificación de 1992.

Desde que en 1964 se fundara el Instituto de Estructuras Ligeras en la Universidad de Stuttgart se siguió profundizando en la sistematización de la morfología estructural, ya como parte de las líneas de investigación del Instituto, ya como parte de los programas de investigación específica impulsados por el gobierno alemán SFB 64 "*Weitgespannte Flächen-tragwerke*" (Estructuras ligeras de grandes luces) y SFB 230 "*Natürliche Konstruktionen*" (Estructuras naturales). Se fueron incorporando nuevos trabajos de investigación de alumnos y colaboradores del Instituto, para culminar en 1992¹²⁷ con la publicación del volumen IL 23 de la serie "*Mitteilungen*", dedicado específicamente a la clasificación de las estructuras. Este volumen, a su vez, era el tercero de la serie de 5 volúmenes centrados en el estudio de la relación entre la forma, la estructura y la masa, que concluye con el principio de la construcción ligera.

Se trata pues de una sistematización de la morfología estructural en la que está muy presente como trasfondo el objetivo de la ligereza. La visión de las estructuras y el método elegido para establecer una clasificación que ordene este vasto universo de posibilidades está pues muy condicionada por una intención de fondo: la búsqueda de un entendimiento de las relaciones entre la forma, el material y la capacidad de transmitir fuerzas con el mínimo empleo de material y energía. Así lo expresa el diagra-

¹²⁷ OTTO, F., et al.: *IL 23. Konstruktion. Ein Vorschlag zur Ordnung und Beschreibung von Konstruktionen. Form-Kraft-Masse* 3. K. Krämer. Stuttgart, 1992.

ma de Frei Otto que se muestra a continuación (fig. 73), y que a modo de síntesis gráfica de la clasificación de las estructuras propuesta se publicó en 1992.

En él se pueden observar los parámetros básicos que han dado lugar a la clasificación, y que constituyen el sistema de coordenadas que establece la combinatoria que daría lugar a los diferentes tipos estructurales. Por un lado vemos remarcados los tres grandes temas ya mencionados: forma, fuerza, y masa. Por otro lado aparecen también resaltados los

Fig.73 Sinopsis gráfica de la relación entre forma, fuerza, masa y material, y de diferentes sistemas estructurales de la naturaleza y de la técnica, elaborada por Frei Otto y publicada en 1992. Fuente: IL 23 pág. 17

73

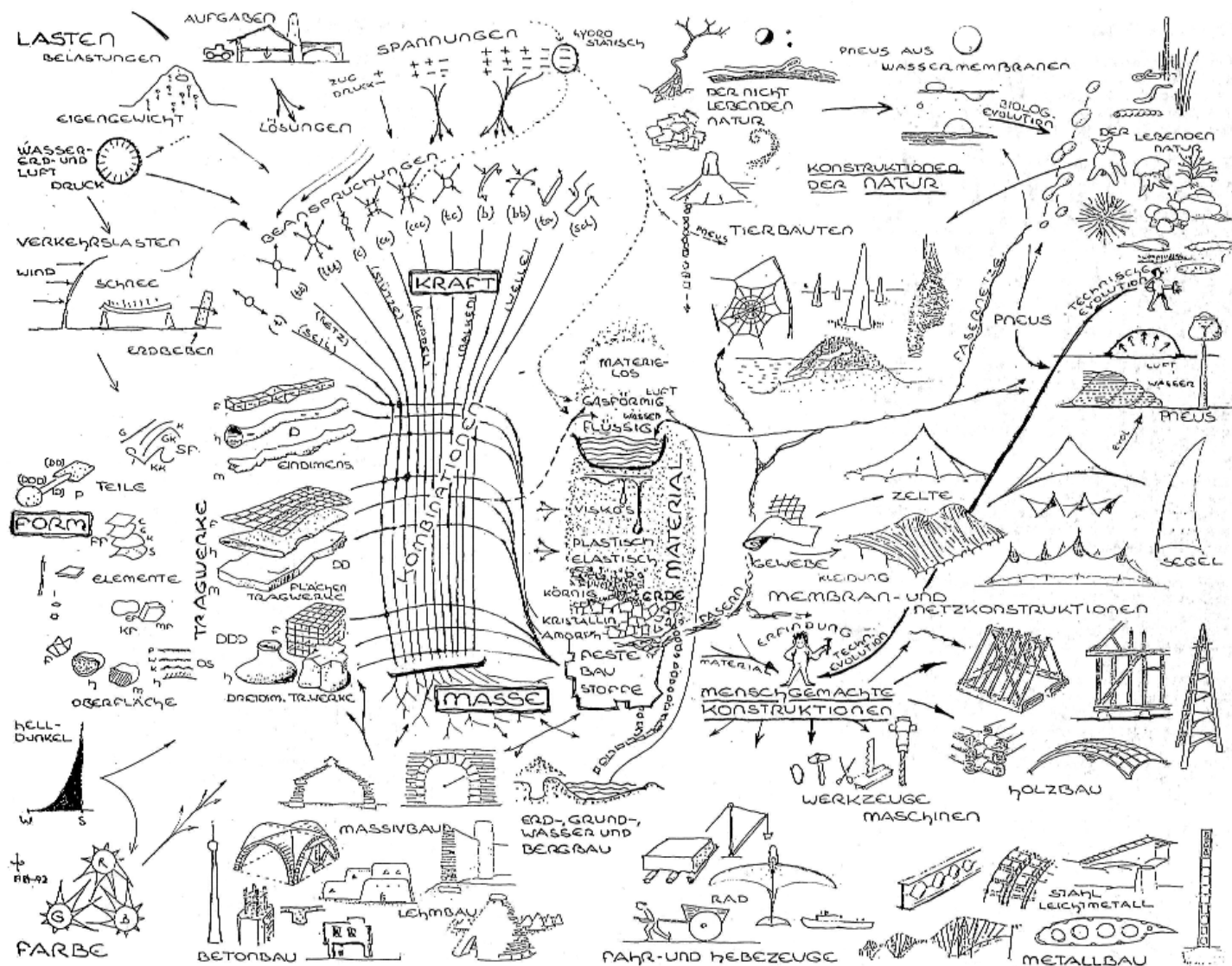
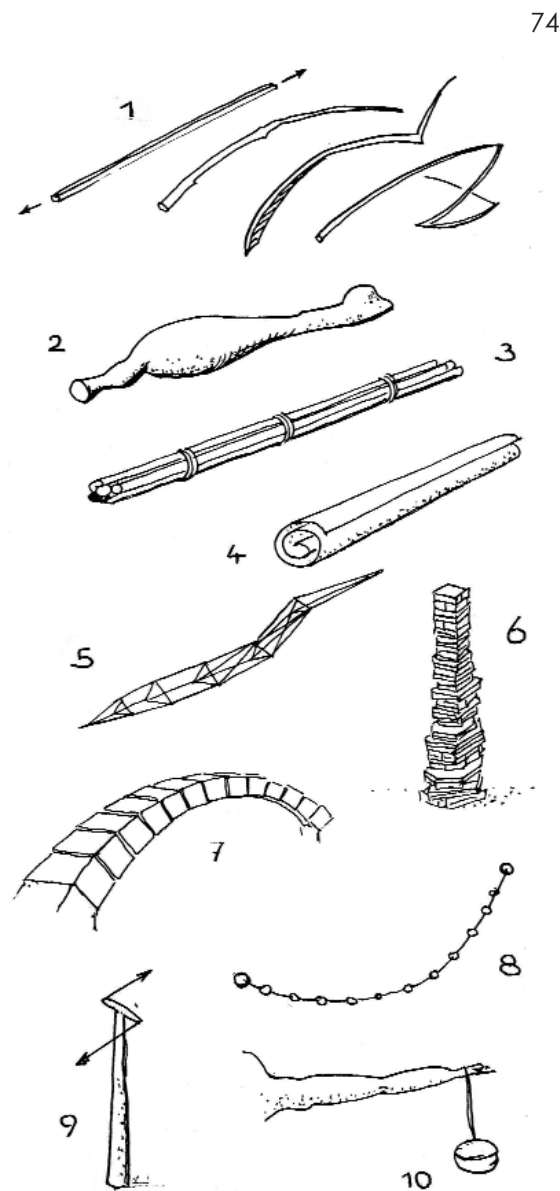


Fig. 74 Estructuras unidimensionales. Dibujos de Frei Otto.
Fuente: IL 23 pág. 75

parámetros de carga o acción exterior, y material, mientras que por otra parte también se hace referencia a los procesos de formación de las estructuras al aparecer en el diagrama incluidas, y a la vez diferenciadas, las estructuras naturales y las estructuras construidas por el hombre.

La forma de los objetos, su dimensión, sus partes y elementos, el tipo de acción o carga exterior, los esfuerzos internos desarrollados para contrarrestar las acciones exteriores, la capacidad portante del material y su constitución o estructura interna constituyen pues criterios fundamentales que han dado lugar a esta clasificación de las estructuras.

Sin embargo, los criterios primarios, los que generan los grandes grupos de la clasificación, son criterios relativos a la forma, a la geometría de las estructuras. Así las estructuras uni-, bi- y tridimensionales son los primeros apartados de la clasificación, que combinados con los tipos fundamentales de sollicitaciones (tracción, compresión, flexión) configuran los principales grupos de la clasificación. Vamos a recorrer a continuación estos tres primeros apartados.

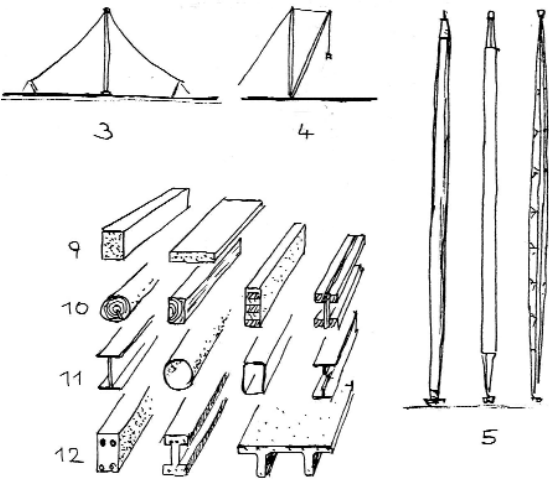


V.2.1. Estructuras unidimensionales.

Dentro de este grupo se establece una diferenciación entre estructuras unidimensionales rectas, curvadas en un plano, curvadas en el espacio y quebradas o dobladas (fig. 74.1). Pueden tener una sección transversal variable con diferentes espesores a lo largo de su longitud (fig. 74.2), y pueden consistir en diferentes elementos, como por ejemplo grandes elementos unidimensionales (fig. 74.3) o incluso grandes elementos bidimensionales (fig. 74.4), pero también pueden consistir en pequeños elementos uni- (fig. 74.5), bi- (fig. 74.6) y tridimensionales (fig. 74.7). Por supuesto se mencionan también las diferentes sollicitaciones a las que pueden estar sometidos: tracción (fig. 74.1 y 8), compresión (fig. 74.6 y 7), torsión (fig. 74.9) y flexión (fig. 74.10).

También se menciona la posibilidad de que las estructuras unidimensionales tengan cavidades o sean totalmente huecas, así como la distinción entre estructuras de forma estable o rígidas, y estructuras flexibles cuya forma se hace estable sólo cuando están sometidas a alguna acción exterior.

Después de esta exposición de criterios generales se abordan en primer lugar las estructuras unidimensionales rectas. Entre ellas se diferencian las estructuras verticales flexibles (cables, cuerdas, fibras) y las rígidas, y dentro de éstas las apoyadas en el suelo con el otro extremo libre, y las que están sujetas también en el extremo superior. De entre estas últimas se distinguen los soportes sujetos por elementos rígidos, como en las estructuras reticulares, y los sujetos por elementos flexibles, como en las estructuras de



tiendas y grúas (fig. 75.3 y 4). En este último caso se señalan los mástiles de madera, los de tubo de acero y los de celosía de acero (fig. 75.5A, B, C).

Por otro lado se distinguen, dentro de las estructuras unidimensionales rectas, las vigas resistentes a flexión, entre las cuales se señalan diferentes formas caracterizadas por el material y la sección transversal (fig. 75.9, 10, 11 y 12), y otras formas de vigas de mayor luz, caracterizadas también por el material y las disposiciones en celosía o en secciones macizas y alveolares (fig. 76.15, 16, 17 y 18). Por último, dentro de las estructuras unidimensionales formadas por barras rectas rígidas a flexión, se mencionan los pórticos como caso particular caracterizado por un contorno de forma quebrada con esquinas también rígi-

75

76

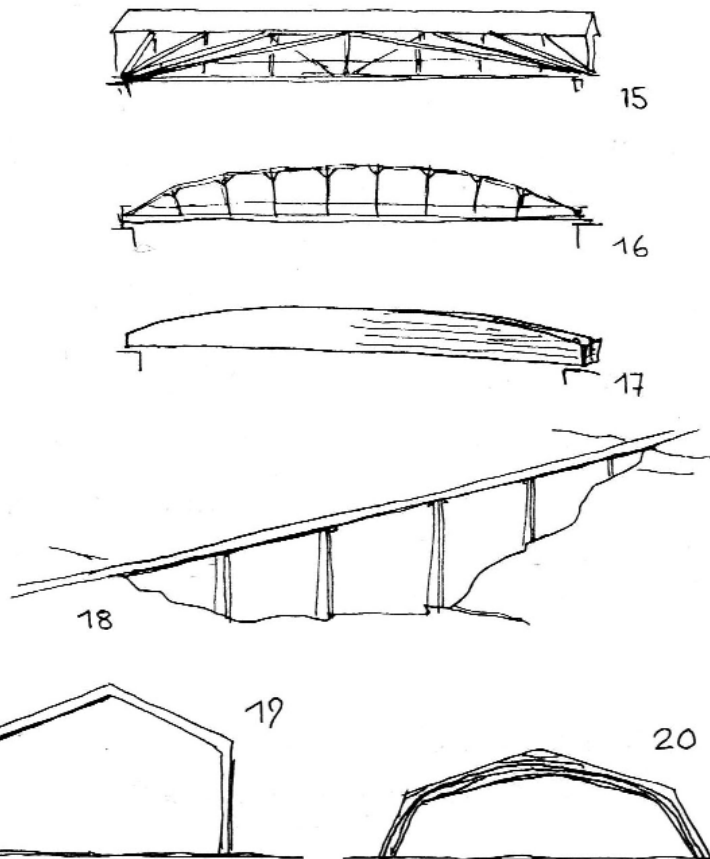


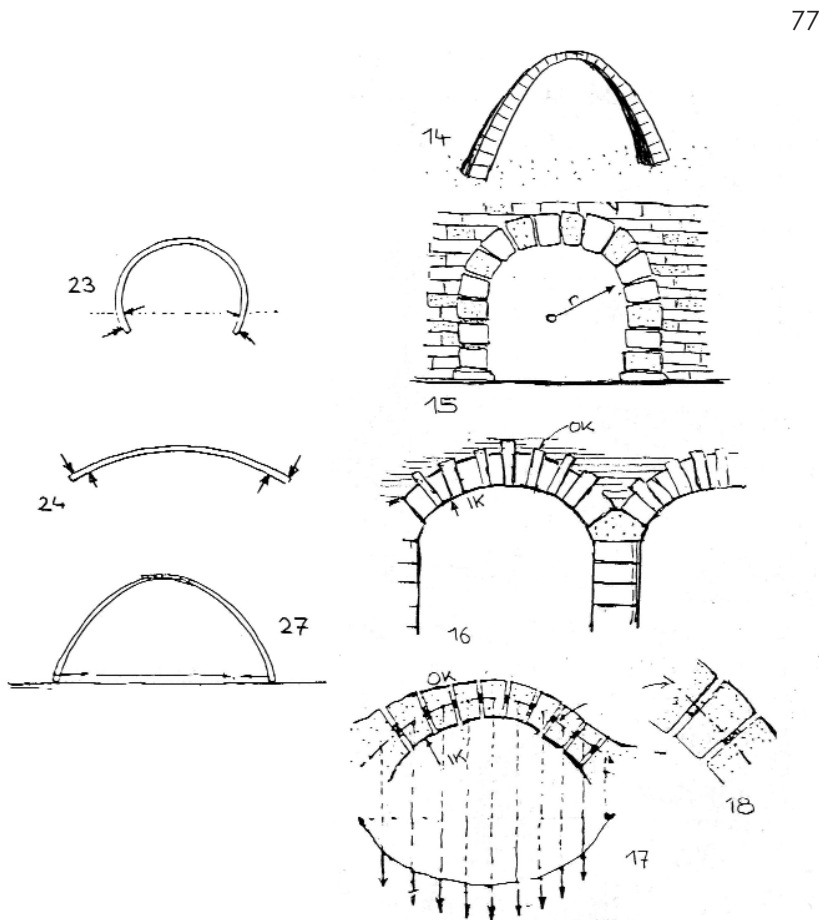
Fig. 75 Estructuras unidimensionales rectas. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 78

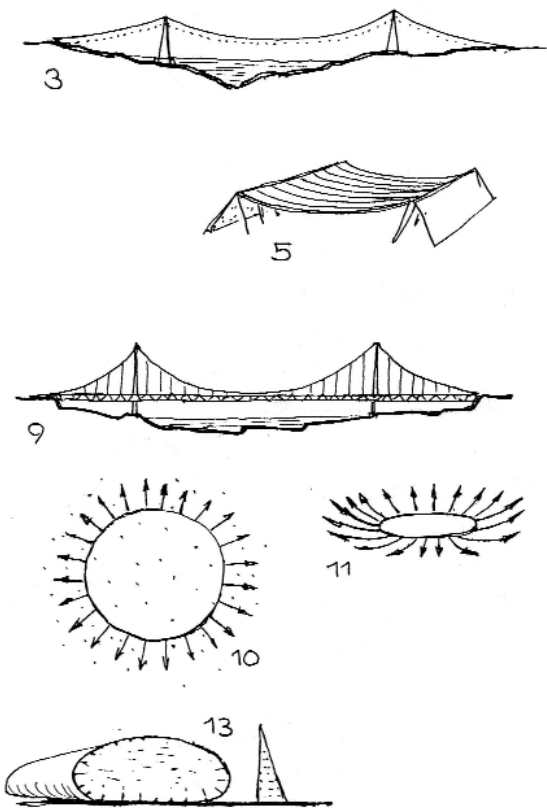
das a flexión, que se extendió con el uso del acero en la construcción y cuyo uso se ha generalizado actualmente también con el hormigón armado y la madera laminada (fig. 76.19 y 20).

Otro de los grandes grupos dentro de las estructuras unidimensionales es el de las estructuras unidimensionales curvadas. Al abordar este grupo en la clasificación se diferencian por un lado la barra curvada (fig. 77.23-27), el cable curvado y/o doblado (fig. 78), y el arco (fig. 77.14-18). La propia palabra "arco", que en español designa, dentro del ámbito de la construcción, una estructura formada por piezas cuneiformes o dovelas que en su conjunto trabaja a compresión, también se usa en español para designar una barra flexible

Fig. 76 Estructuras formadas por barras unidimensionales rectas y rígidas. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 78

Fig. 77 Barras curvadas (23-27) y arcos (14-18). Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 79 y 81





78

“arqueada” sometida a flexión por un tirante que a su vez está tensado por la sollicitación de tracción que la barra flexionada ejerce sobre él. Ello conduce a que, aunque el comportamiento resistente de ambas estructuras sea muy distinto, el concepto geométrico de arco sea la forma común en ambos casos, y llegue a considerarse en la clasificación “el arco de piedra como una forma especial de barra arqueada”¹²⁸.

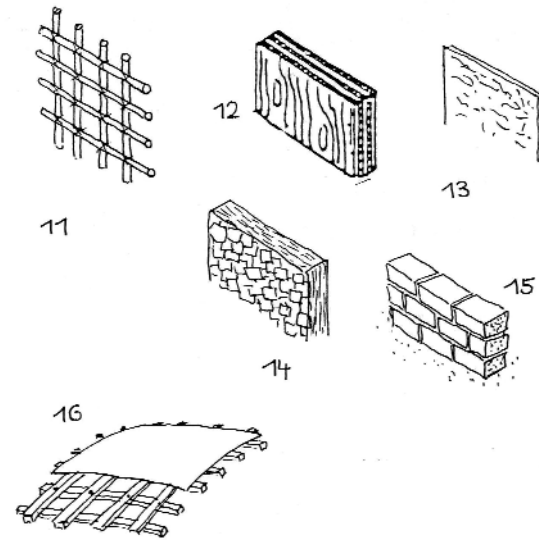
La línea de empujes de un arco, que tan solo desde hace unos doscientos años se sabe que es idéntica a la línea formada por una cuerda que está cargada del mismo modo que las dovelas del arco (fig. 77.14, 17 y 18), nos sugiere la conexión con el cable curvado y doblado. La catenaria, la parábola, el círculo, la curva tubular, son las formas geométricas lineales que aparecen en el grupo de estructuras unidimensionales de cable curvado y/o doblado, según se trate, respectivamente, de cargas uniformemente repartidas a lo largo del eje del cable, de cargas uniformemente repartidas a lo largo de un eje horizontal, de cargas radiales uniformemente repartidas alrededor de un cable circular, o de la acción que ejerce sobre su envolvente flexible un tubo lleno de agua apoyado en el suelo (fig. 78.3, 5, 9, 10, 11, 13).

¹²⁸ Véase OTTO, F., et al.: *IL 23. Konstruktion. Ein Vorschlag zur Ordnung und Beschreibung von Konstruktionen. Form-Kraft-Masse 3*. K. Krämer. Stuttgart, 1992. Pág. 81. (La traducción es propia). Sobre el tema del arco ver también la serie de artículos de Frei Otto y otros titulada “Der Bogen”, publicados en la revista *Arcus*. Números 2, 3 y 4. Marzo-Agosto 1983.

V.2.2. Estructuras bidimensionales o superficiales.

Una primera visión general de este tipo de estructuras en la clasificación nos habla de objetos macizos, huecos o formados por distintos elementos, como una red con nudos esféricos (fig. 79.2, 3 y 4). También de membranas y redes traccionadas, bóvedas laminares comprimidas, bóvedas de celosía de capa única, placas o losas, y estructuras espaciales formando placas (fig. 79.5, 6, 7, 8, 9, 10).

Con relación a los elementos que componen las estructuras bidimensionales o superficiales, se mencionan diferentes posibilidades. Pueden estar compuestas por grandes elementos unidimensionales, como una reja de barras redondas o una red de cables (fig. 80.11), o bien por grandes elementos bidimensionales, como en un tablero de madera contrachapada (fig. 80.12), o bien por pequeños elementos unidimensionales, como en una hoja de cartón (fig. 80.13), o bien por pequeños elementos bidimensionales, como en un tablero de virutas (fig. 80.14), o bien por pequeños elementos tridimensionales, como en un muro o bóveda de fábrica (fig. 80.15). Existen también diversas combinaciones, como por ejemplo la de elementos uni- y bidimensionales en el caso de bóvedas de rejilla o celosía de capa única de listones cubierta por una membrana tensada (fig. 80.16).



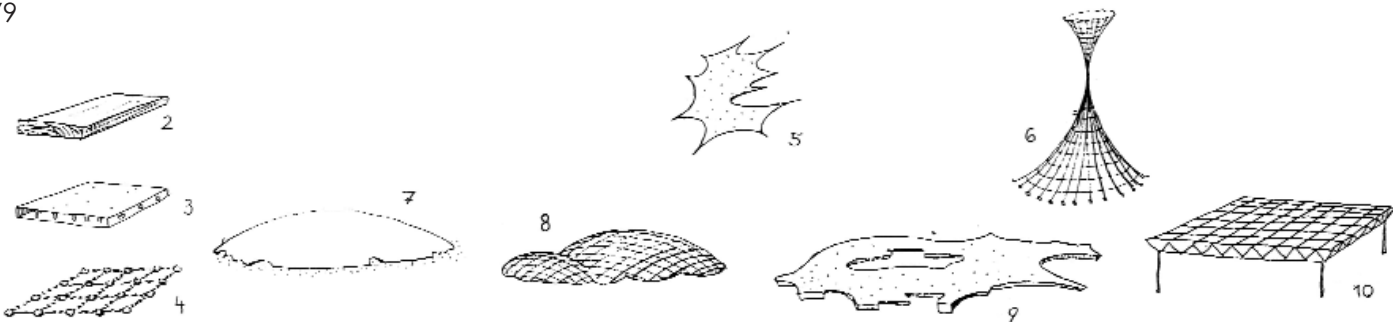
80

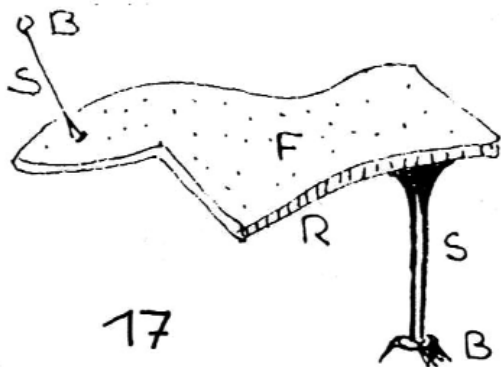
Fig. 78 Cables curvados. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 80

Fig. 79 Estructuras bidimensionales. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 82

Fig. 80 Elementos componentes de estructuras bidimensionales. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 82

79





81

Los elementos constructivos que señala la clasificación como más frecuentes en las estructuras bidimensionales son (fig. 81): la superficie (F), el borde (R), el soporte (S) y la suspensión (B).

Aunque la forma bidimensional sea la típica de las estructuras superficiales, sin embargo éstas también pueden tener, consideradas en su conjunto, formas más o menos uni- y tridimensionales. Pueden ser por tanto predominantemente alargadas, superficiales o espaciales.

Ejemplos de objetos unidimensionales constituidos por redes y membranas bidimensionales serían bandas o cinturones delgados de grandes luces (fig. 82.1), escaleras de cuerda (fig. 82.2), cercas (fig. 82.3), puentes colgantes pretensados (fig. 82.4), mangueras (fig. 82.5). También podemos encontrar ejemplos de objetos predominantemente unidimensionales constituidos por estructuras superficiales en objetos huecos formados por tubos de pared delgada y material rígido, como tallos huecos de plantas (fig. 82.6), estructuras tubulares, cascos de buques, alas y fuselajes de aviones (fig. 82.7), y puentes de sección en cajón (fig. 82.8).

82

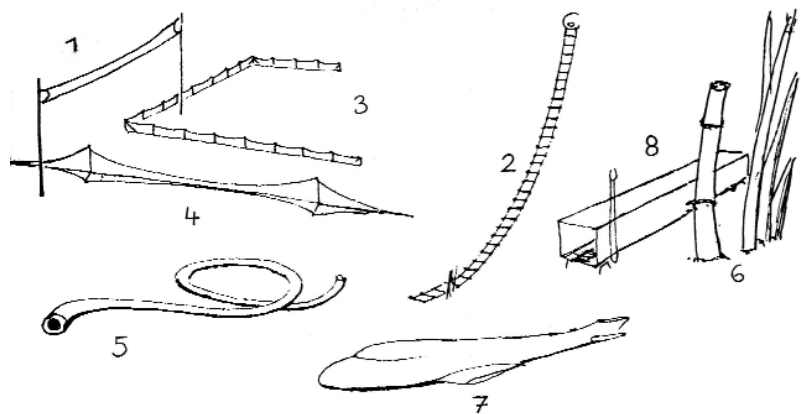


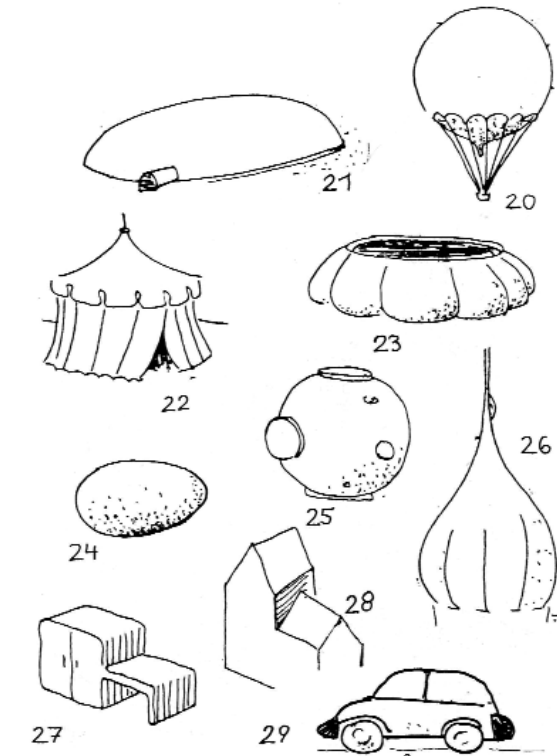
Fig. 81 Elementos constructivos de estructuras bidimensionales. Dibujo de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 82

Fig. 82 Estructuras superficiales unidimensionales. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 83

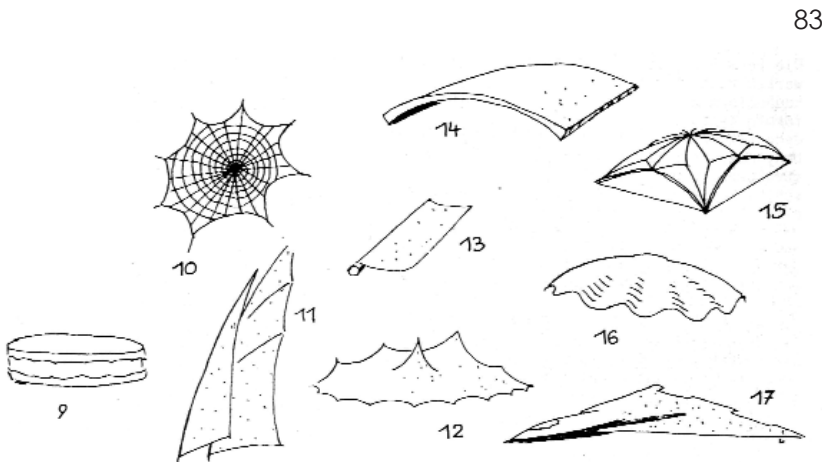
Ejemplos de objetos bidimensionales serían membranas, redes, cáscaras, placas, etc., como membranas de tambor (fig. 83.9), telarañas (fig. 83.10), velas de barcos (fig. 83.11), cubiertas de tiendas (fig. 83.12), toldos (fig. 83.13), bóvedas (fig. 83.14), bóvedas de crucería o nervadas (fig. 83.15), conchas de moluscos (fig. 83.16), alas amplias de avión (fig. 83.17).

Ejemplos de estructuras superficiales que encierran objetos huecos que generalmente son tridimensionales serían los globos de aire (fig. 84.20), las estructuras neumáticas (fig. 84.21), tiendas (fig. 84.22), depósitos de agua (fig. 84.23), huevos de pájaros (fig. 84.24), campanas de buzo (figura 25), agujas de torres (fig. 84.26), muebles (fig. 84.27), casas (fig. 84.28), automóviles (fig. 84.29) y otros medios de transporte, como barcos, aviones, etc.

Una vez considerados los elementos y las formas de las estructuras bidimensionales, la clasificación entra a considerar las sollicitaciones más habituales de este tipo de estructuras.



84



83

Fig. 83 Estructuras superficiales bidimensionales. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 83

Fig. 84 Estructuras superficiales tridimensionales. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 83

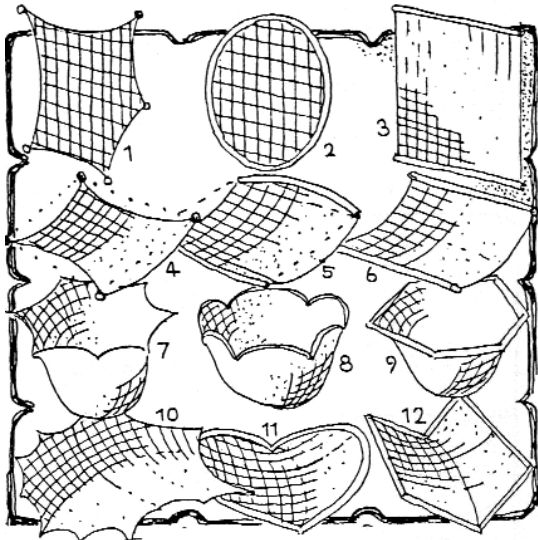


Fig. 85 Tipología de formas de estructuras superficiales traccionadas. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 21 pág. 99

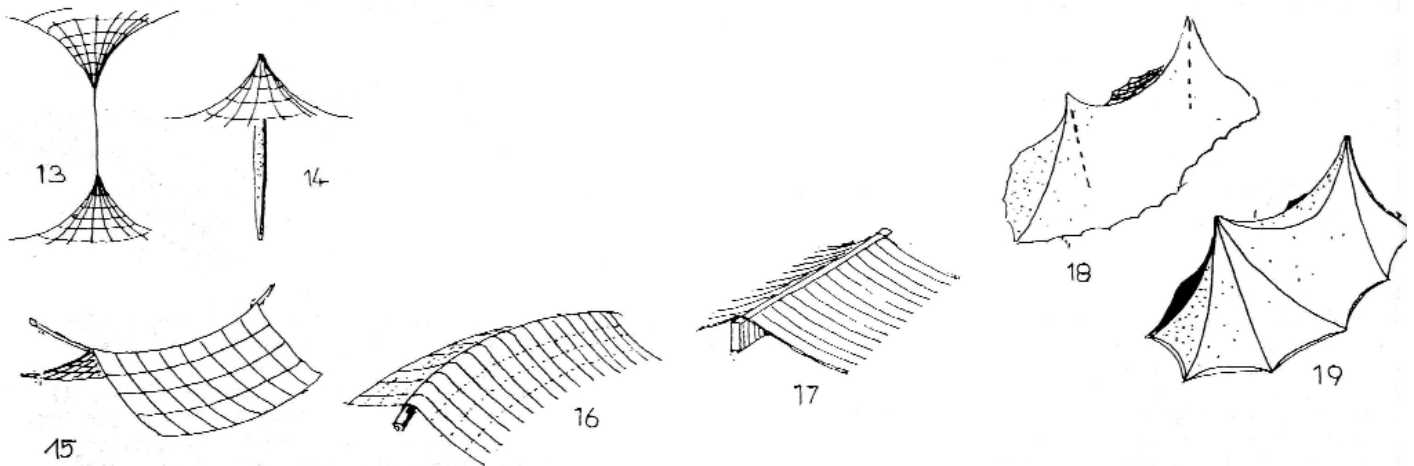
V.2.2.1. Estructuras bidimensionales o superficiales traccionadas.

Las estructuras superficiales traccionadas más importantes están formadas por láminas, membranas, tejidos y redes, y pueden tener las siguientes formas: superficie plana (fig. 85.1, 2 y 3), superficie curvada uniaxialmente (fig. 85.4, 5 y 6), superficie en forma de cúpula (sinclástica): fig. 85.7, 8 y 9, superficie en forma de silla de montar (anticlástica): fig. 85.10, 11 y 12.

Los bordes pueden estar sometidos a diferentes solicitaciones. Pueden ser cables sometidos a tracción (fig. 85.1, 4, 7 y 10), arcos comprimidos (fig. 85.2, 5, 8, 11) y vigas sometidas a flexión (fig. 85.3, 6, 9, 12).

Con respecto a los soportes, éstos pueden ser puntuales, para redes de cables radiales, y en este caso adoptan la forma bien de cables traccionados (fig. 86.13), bien de mástiles comprimidos (fig. 86.14). Los soportes también pueden ser lineales. En este caso se forman aristas (crestas y valles), mediante cables traccionados (fig. 86.15), arcos comprimidos (fig. 86.16) o vigas sometidas a flexión (fig. 86.17).

Fig. 86 Soportes puntuales y lineales para estructuras superficiales traccionadas. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 86



El soporte de las membranas, en especial, pero también el de las redes de malla delgada, precisa realizarse sobre una superficie, mediante un grupo de cables (fig. 87.20), o bien mediante un grupo de barras comprimidas (fig. 87.21), o bien mediante una bóveda de celosía de listones en capa única (fig. 87.22), o bien mediante cojines de membrana tensada neumáticamente (fig. 87.23), o bien mediante estructuras con soportes radiales a modo de paraguas (fig. 87.24).

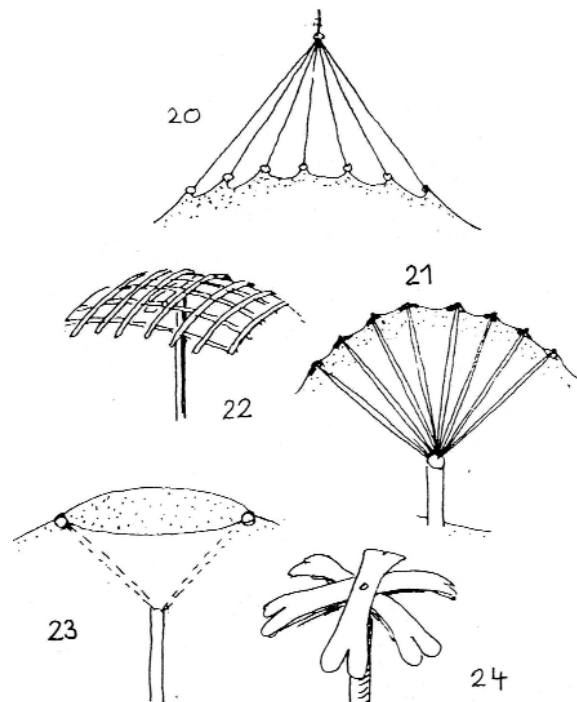
La sujeción del borde se puede producir directamente en la cimentación (fig. 88.1), o mediante miembros traccionados, como cables (fig. 88.2), o mediante mástiles comprimidos (fig. 88.3), o bien mediante vigas o soportes sometidos a flexión (fig. 88.4)

Las aberturas realizadas en redes y membranas, en particular aquéllas que están bordeadas por cables, son igualmente adecuadas para la función de soporte. Una abertura se eleva en un punto mediante un cable (fig. 89.5). La abertura también puede estar sujeta por uno, dos, tres, cuatro o más cables (fig. 89.6 y 7). Las aberturas pueden estar soportadas además por anillos comprimidos (fig. 89.8), barras comprimidas (fig. 89.9), o miembros sometidos a flexión (fig. 89.10).

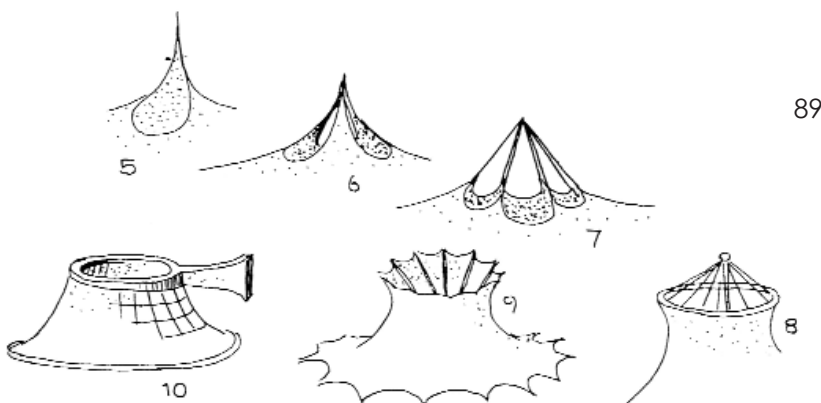
Fig. 87 Soportes superficiales para estructuras superficiales traccionadas. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 86

Fig. 88 Tipos de sujeción del borde para estructuras superficiales traccionadas. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 87

Fig. 89 Aberturas en redes y membranas para permitir la función de soporte. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 87

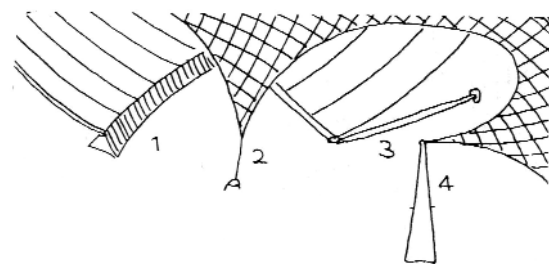


87



89

88



V.2.2.2. Estructuras bidimensionales o superficiales comprimidas.

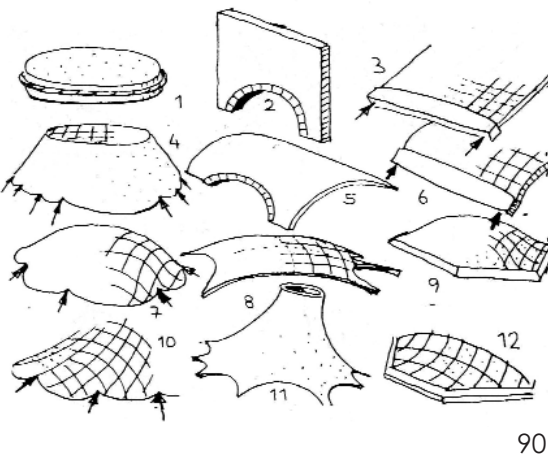
La clasificación presenta de nuevo las formas superficiales básicas, esta vez como formas de las estructuras superficiales comprimidas: la superficie plana (fig. 90.1, 2 y 3), la superficie de simple curvatura (fig. 90.4, 5 y 6), la superficie sinclástica, en forma de cúpula (fig. 90.7, 8 y 9), y la superficie anticlástica, en forma de silla de montar (fig. 90.10, 11 y 12).

Se señalan también las diferentes solicitaciones a las que pueden estar sometidos los bordes portantes: miembros traccionados (fig. 90.1, 4, 7, 10), miembros comprimidos (fig. 90.2, 5, 8, 11) y miembros sometidos a flexión (fig. 90.3, 6, 9, 12).

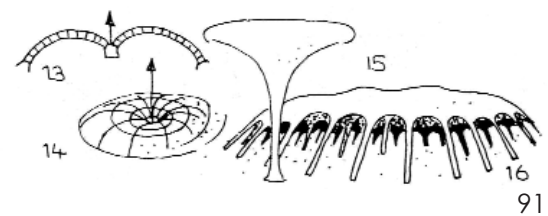
Los soportes de estas estructuras superficiales comprimidas pueden ser puntuales, mediante miembros traccionados (fig. 91.13 y 14), o bien mediante uno (fig. 91.15) o varios soportes comprimidos (fig. 91.16).

Los soportes también pueden ser lineales, formando valles que pueden estar constituidos por miembros traccionados, como cables (fig. 92.17), por miembros comprimidos, como arcos (fig. 92.18), y por vigas sometidas a flexión (fig. 92.19).

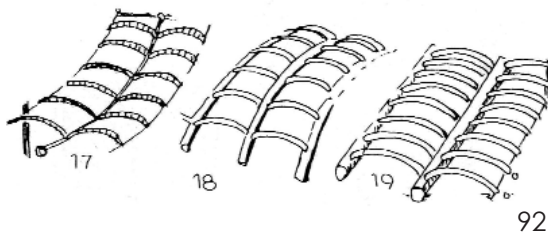
Los bordes de las estructuras superficiales comprimidas pueden apoyar directamente sobre la cimentación (fig. 93.20), o bien sobre hileras de pilares (fig. 93.21), o bien sobre muros (fig. 93.22, 23).



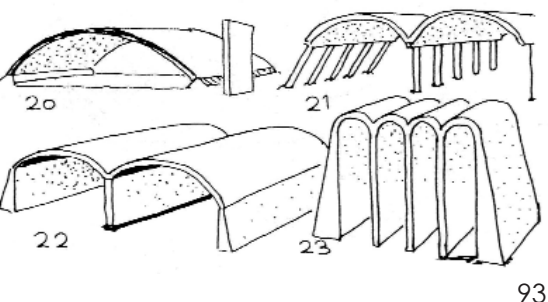
90



91



92



93

Fig. 90 Tipología de formas de estructuras superficiales comprimidas. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 88

Fig. 91 Soportes puntuales para estructuras superficiales comprimidas. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 88

V.2.2.3 Estructuras superficiales traccionadas y comprimidas.

En la clasificación se distinguen como categoría singular las estructuras superficiales en las que la superficie está sometida a tracción en una dirección, y a compresión en otra dirección. Si estas estructuras superficiales son cerradas, se les denomina "cáscaras", entendiéndose por tales a las estructuras superficiales curvadas y rígidas¹²⁹. El hiperboloide (fig. 94.1) y el paraboloides hiperbólico (fig. 94.2) son geometrías que asumen dentro de esta categoría un papel principal, una vez conocidas sus capacidades portantes.

Las características de este grupo de estructuras superficiales se pueden reconocer especialmente en aquellas estructuras que se componen de barras sólidas en una dirección y de membranas o cables en la otra dirección (fig. 95.3), tales como velas de barcos (fig. 95.4), abanicos (fig. 95.5) o toldos de carro (fig. 95.6).

No obstante se incluye la observación de que todos los elementos que son resistentes a compresión deben presentar también una cierta resistencia a flexión. Hay por tanto una transición sin solución de continuidad entre por ejemplo las estructuras superficiales traccionadas y comprimidas, y las estructuras superficiales sometidas a flexión y tracción.

A continuación se muestran algunos ejemplos de entre los objetos más evidentes o más frecuentes.

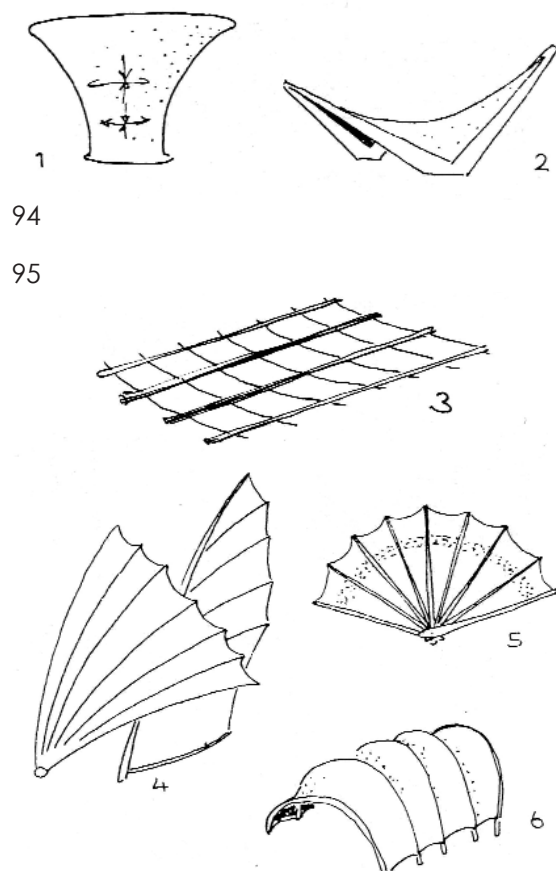


Fig. 92 Soportes lineales para estructuras superficiales comprimidas. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 88

Fig. 93 Soportes de los bordes de estructuras superficiales comprimidas. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 88

Fig. 94 Estructuras superficiales traccionadas y comprimidas. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 89

Fig. 95 Estructuras superficiales compuestas de barras y membranas o cables. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 89

¹²⁹ Esta breve y clara definición de las "cáscaras", o estructuras laminares, como "estructuras superficiales curvadas y rígidas" fue propuesta por Frei Otto en la *Conferencia Mundial sobre Estructuras Laminares* celebrada del 1 al 4 de Octubre de 1962 en San Francisco (Estados Unidos). Véase OTTO, F. (ed.): *Tensile Structures*. vol. II. MIT Press. Cambridge / London, 1969. Pág. 13.

V.2.2.3.1. Superficies planas

Al grupo de estructuras superficiales no curvadas sometidas a tracción y compresión, o bien a flexión y tracción, pertenecerían las vallas y los cortavientos (fig. 96.11), las celosías radiales verticales (fig. 96.12), los toldos plegables horizontales (fig. 96.13), las velas de barcos, e incluso las plumas de pájaros (fig. 96.14). F96

V.2.2.3.2. Superficies de simple curvatura

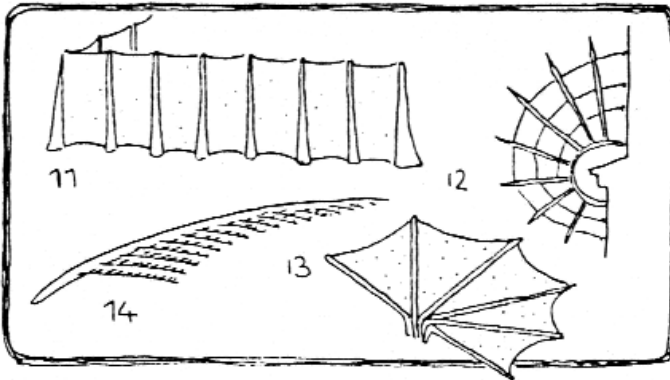
Se incluirían aquí las redes de barras arqueadas y cables tensados longitudinalmente (fig. 97.17 y 18) y, como ejemplos más característicos, el cono colgante con cables rectos y anillos comprimidos (fig. 97.19), y el cono invertido con barras rectas y cables longitudinales (fig. 97.20).

V.2.2.3.3. Superficies sinclásticas en forma de cúpula.

Ejemplos serían la cúpula suspendida del centro (fig. 98.21), la cáscara erguida, con miembros curvados rígidos comprimidos y anillos traccionados (fig. 98.22), el paraguas, con nervios arqueados revestidos por una membrana (fig. 98.23), los manojos de cañas sujetos con cuerdas (fig. 98.24), o el tonel formado por duelas y anillos (fig. 98.25).

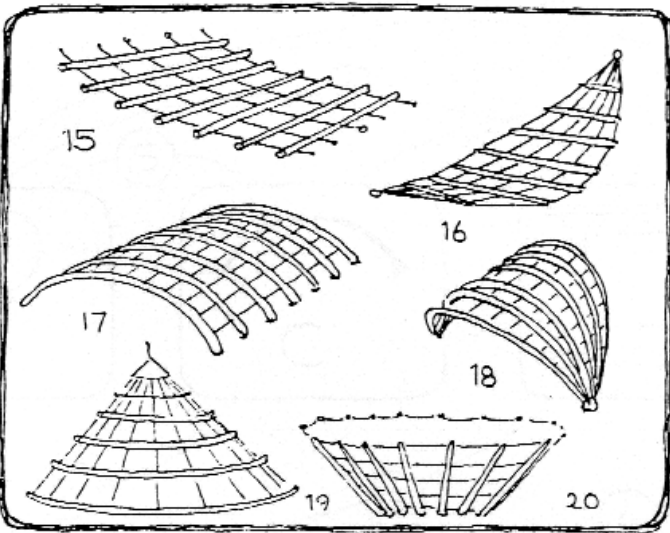
V.2.2.3.4. Superficies anticlásticas en forma de silla de montar.

De las muchas posibilidades de este grupo dos ejemplos serían la copa en forma de embudo (fig. 99.26) y el paraboloide hiperbólico (fig. 99.27).



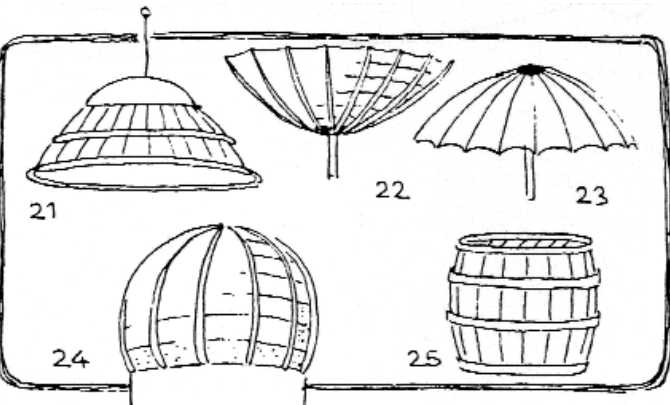
96

Fig. 96 Estructuras superficiales traccionadas y comprimidas: superficies planas. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 21 pág. 107



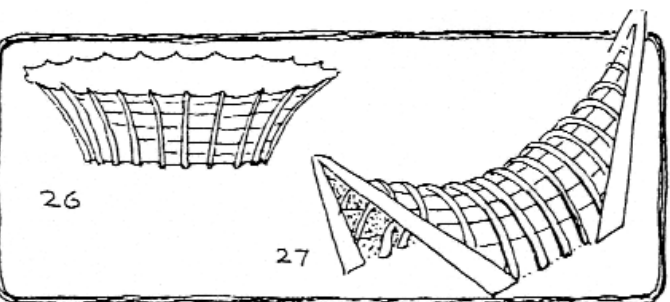
97

Fig. 97 Estructuras superficiales traccionadas y comprimidas: superficies de simple curvatura. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 21 pág. 107



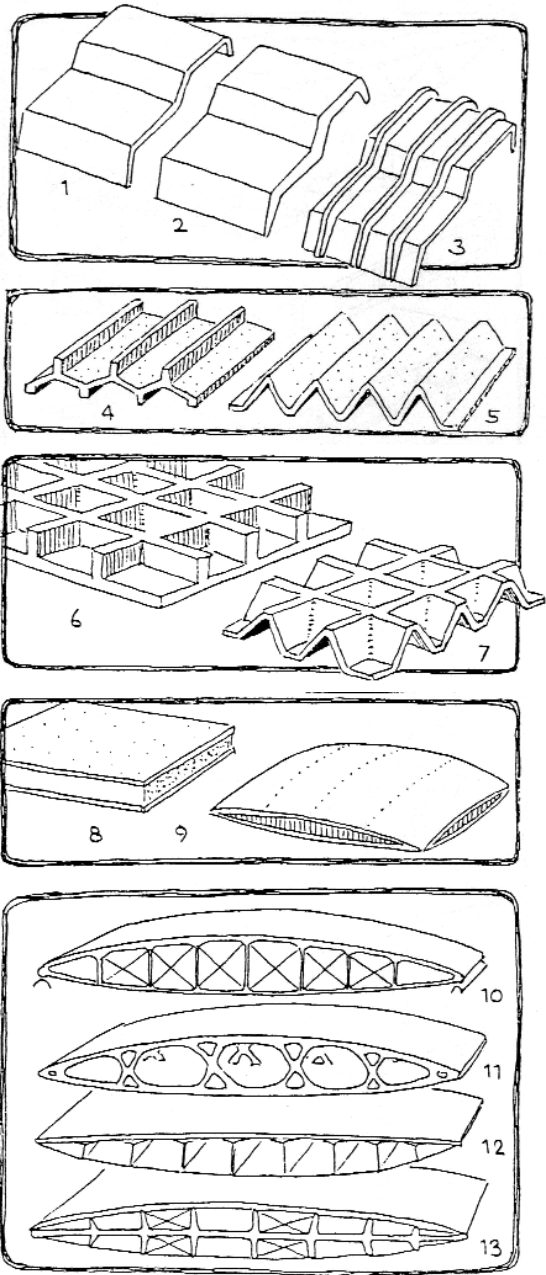
98

Fig. 98 Estructuras superficiales traccionadas y comprimidas: superficies sinclásticas en forma de cúpula. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 21 pág. 107



99

Fig. 99 Estructuras superficiales traccionadas y comprimidas: superficies anticlásticas en forma de silla de montar. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 21 pág. 107



100 a 103

Fig. 100 Estructuras superficiales sometidas a flexión reforzadas por nervios o pliegues. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 21 pág. 104

Fig. 101 Flexión en dos direcciones y retícula de refuerzo formada por nervios o pliegues. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 21 pág. 104

V.2.2.4 Estructuras superficiales sometidas a flexión.

Las estructuras superficiales sometidas a flexión si son muy delgadas tienen poca resistencia y poca rigidez (fig. 100.1). Se puede incrementar su resistencia si se aumenta su espesor (fig. 100.2), pero se hacen más pesadas, a no ser que se refuercen con nervios o con pliegues (fig. 100.3, 4 y 5).

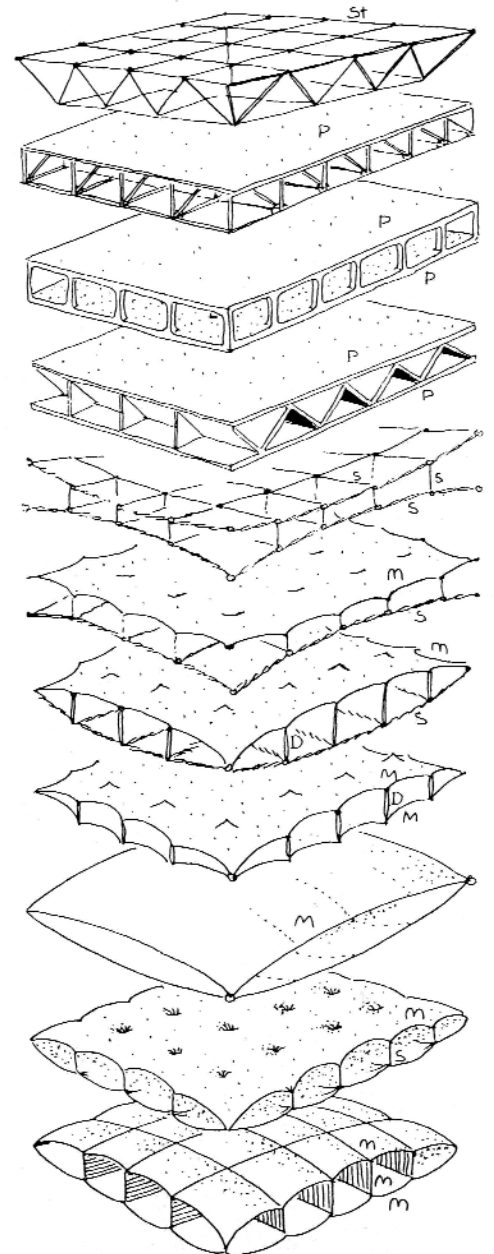
Si la estructura está sometida a flexión en una sola dirección los nervios y los pliegues son lineales y paralelos según la dirección de la solicitación. Si la estructura está sometida a flexión en dos direcciones la resistencia y rigidez se incrementan con una retícula de nervios o de pliegues (fig. 101.6 y 7).

La capa interior de una placa está menos solicitada, por lo que se tiende a aligerar ésta con un material intermedio, como una espuma de plástico, dispuesto entre dos capas o placas exteriores resistentes a tracción y a compresión, dando lugar a las llamadas estructuras en sandwich (fig. 102.8). Para adaptarse mejor a las solicitaciones las capas exteriores y la capa intermedia pueden ser de espesor variable (fig. 102.9).

La capa intermedia se puede sustituir por un entramado ligero de barras (fig. 103.10 y 11). Especialmente ligeras son las placas con cables traccionados en la capa inferior (fig. 103.12).

En la clasificación el concepto de estructura espacial se aplica a las estructuras superficiales extremadamente ligeras, generalmente sometidas a flexión, que pueden estar formadas por barras (St), placas (P), cables (S) y/o membranas (M). Se señalan también las once variaciones más importantes (fig. 104):

1. Placa formada por barras resistentes a tracción y a compresión.
2. Placa resistente a tracción y compresión situada en la cara superior reforzada por un entramado de barras en la cara inferior.
3. Dos placas resistentes a tracción y a compresión conectadas por barras.
4. Dos placas resistentes a tracción y a compresión conectadas por una estructura plegada ligera (un ejemplo sería el cartón ondulado).
5. Una red espacial plana de cables pretensados.
6. Una red espacial plana de cables pretensados como la del apartado anterior, en la que la red superior ha sido sustituida por una membrana.
7. Una membrana superior elevada y tensada por barras verticales unidas a una red inferior de cables tensados.
8. Dos membranas tensadas y mantenidas separadas por barras comprimidas.
9. Estructura de cojín neumático formada por una membrana superior y otra inferior con cierre lateral.
10. Estructura neumática similar a la anterior con tensores interiores que tiran hacia adentro en determinados puntos.
11. Cojín tensado neumáticamente con paredes de membrana que se cruzan en el interior de la cámara intermedia y aumentan la rigidez.



104

Fig. 102 Estructuras en sandwich. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 21 pág. 104
 Fig. 103 Placas aligeradas. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 21 pág. 104
 Fig. 104 Estructuras espaciales Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 91

Fig. 105 Estructuras tridimensionales. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 96

Fig. 106 Elementos en una estructura de edificación. Dibujo de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 96

Fig. 107 Estructuras tridimensionales sólidas sometidas a una presión de tipo hidrostático. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 97

Como conclusión del grupo de estructuras superficiales o bidimensionales la clasificación señala las posibles combinaciones de este tipo de estructuras entre sí, para lo cual considera cinco tipos básicos y las diez posibilidades de combinarse entre sí por parejas.

Los tipos considerados son los siguientes:

1. Tiendas: estructura de membrana y red que puede estar pretensada o no.
2. Estructuras neumáticas: estructuras de membrana y red neumáticamente cargadas, como salas neumáticas, velas, paracaídas.
3. Bóvedas: principalmente cáscaras y celosías de capa única comprimidas.
4. Estructuras superficiales sometidas a flexión: placas, cáscaras sometidas a flexión, estructuras espaciales compuestas por elementos uni- y bidimensionales no sometidos a flexión.
5. Cáscaras principalmente sometidas a tracción y a compresión.

V.2.3. Estructuras tridimensionales.

En la clasificación se distingue entre estructuras tridimensionales sólidas (fig. 105.5, 7, 9) y huecas (fig. 105.6, 8, 10). Se señala también que las estructuras tridimensionales pueden estar compuestas por grandes elementos unidimensionales (fig. 105.9), como celosías o retículas espaciales formadas por soportes, vigas o cables (fig. 105.10), y bidimensionales (fig. 105.7), como la construcción en casetones (fig. 105.8).

Las estructuras tridimensionales tratadas en la clasificación son en su mayor parte las consideradas más importantes o más frecuentes de entre todas ellas. Por ejemplo las edificaciones de una cierta complejidad, que son en su mayoría tridimensionales, y se componen de diferentes elementos constructivos de todas dimensiones con acciones y solicitaciones muy variadas. En la figura 106 se muestran diferentes ejemplos de grandes elementos uni- (d) y bidimensionales (dd), así como de elementos uni- (d), bi- (dd) y tridimensionales (ddd).

Se señalan también los cuerpos sólidos sometidos a una presión de tipo hidrostático, es decir, una presión homogénea en todas direcciones, que es el tipo de presión más frecuente en la naturaleza. Actúa en todos los gases y los líquidos y también en el interior de los astros, en el interior de la tierra, en el mar, en las montañas, en el aire y en las gotas finas de niebla o en las burbujas de aire que se encuentran en el agua. Estos cuerpos sólidos en forma de amontonamientos o cúmulos de material pueden soportar cargas considerables, por lo que se utilizan a menudo como elementos estructurales para formar terraplenes artificiales (fig. 107.20), presas (fig. 107.21) o diques (fig. 107.22)

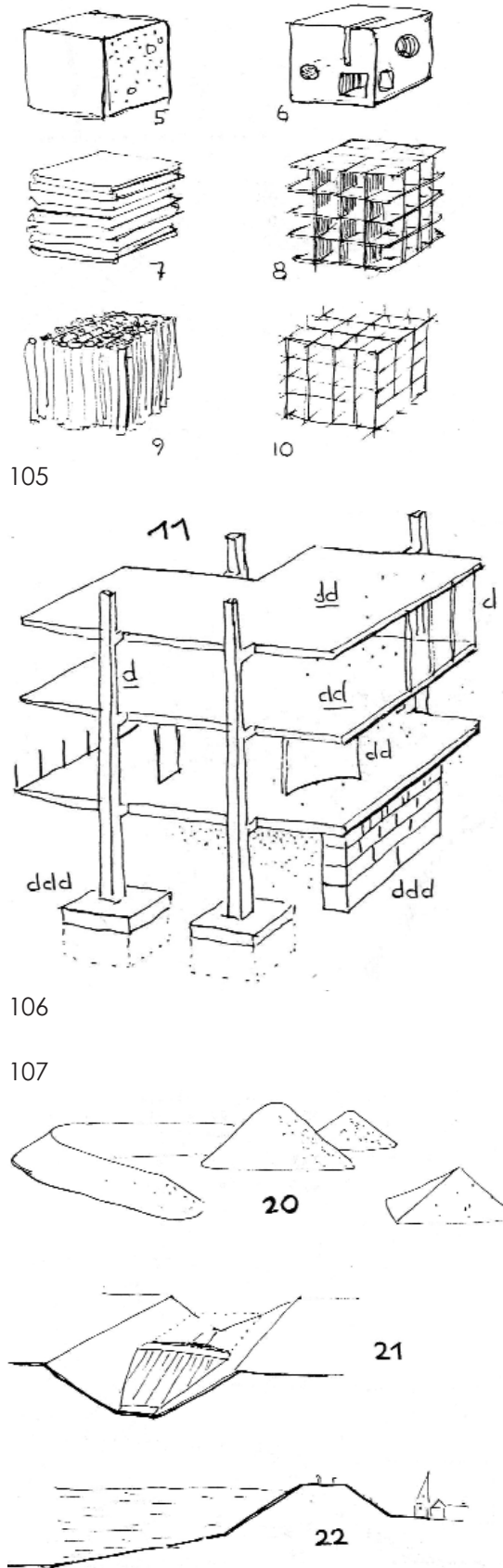


Fig. 108 Estructuras tridimensionales traccionadas. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 98

Fig. 109 Secciones transversales de formas típicas de cavidades. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 99

Fig. 110 Afinidad estructural entre montañas excavadas y "montañas artificiales" de bóvedas. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 100

V.2.3.1. Estructuras tridimensionales traccionadas.

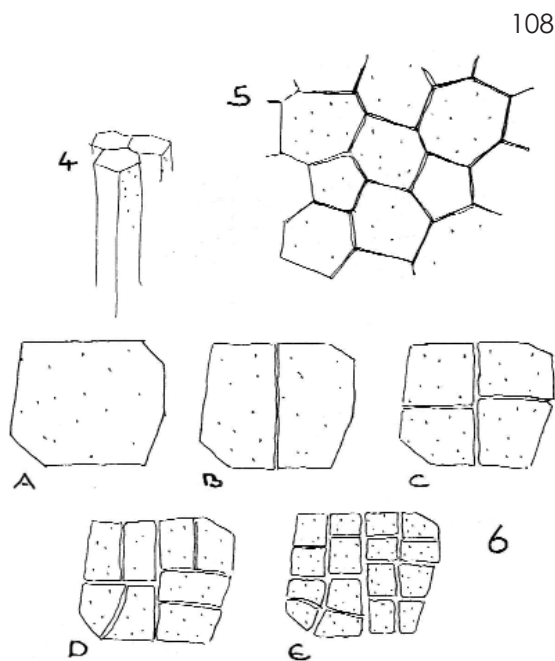
Las estructuras tridimensionales pueden estar traccionadas en uno, dos, o tres ejes. Las estructuras más macizas y pesadas están sometidas a estas acciones especialmente con los cambios térmicos y otros procesos de contracciones. Los objetos tridimensionales que están expuestos a variaciones de temperatura y/o humedad a menudo están solicitados hasta tal punto que se produce la rotura. Los materiales más duros, en especial las rocas, son los más sensibles a estas sollicitaciones.

Con el proceso de enfriamiento y consiguiente contracción de la superficie se produce la fisuración. Las conocidas columnas de basalto se pueden entender a la luz de este fenómeno (fig. 108.4).

A medida que aumenta el enfriamiento va penetrando la fisuración cada vez a mayor profundidad y en dirección perpendicular a la superficie enfriada. En la mayor parte de los casos el dibujo que forman las fisuras en la superficie es hexagonal (fig. 108.5).

Esto es válido también en el caso de la contracción de capas de arcilla. Un dibujo completamente distinto se puede producir en objetos más pequeños si van apareciendo las fisuras una detrás de otra (fig. 108.6).

Con la exposición al calor exterior se producen en el interior de las rocas tensiones triaxiales de tracción que a menudo conducen a la fisuración. Con ello se va destruyendo el interior de las rocas o se va ahuecando y erosionando por el viento y el agua, pudiendo llegar a formarse de este modo grandes arcos y cavidades naturales.



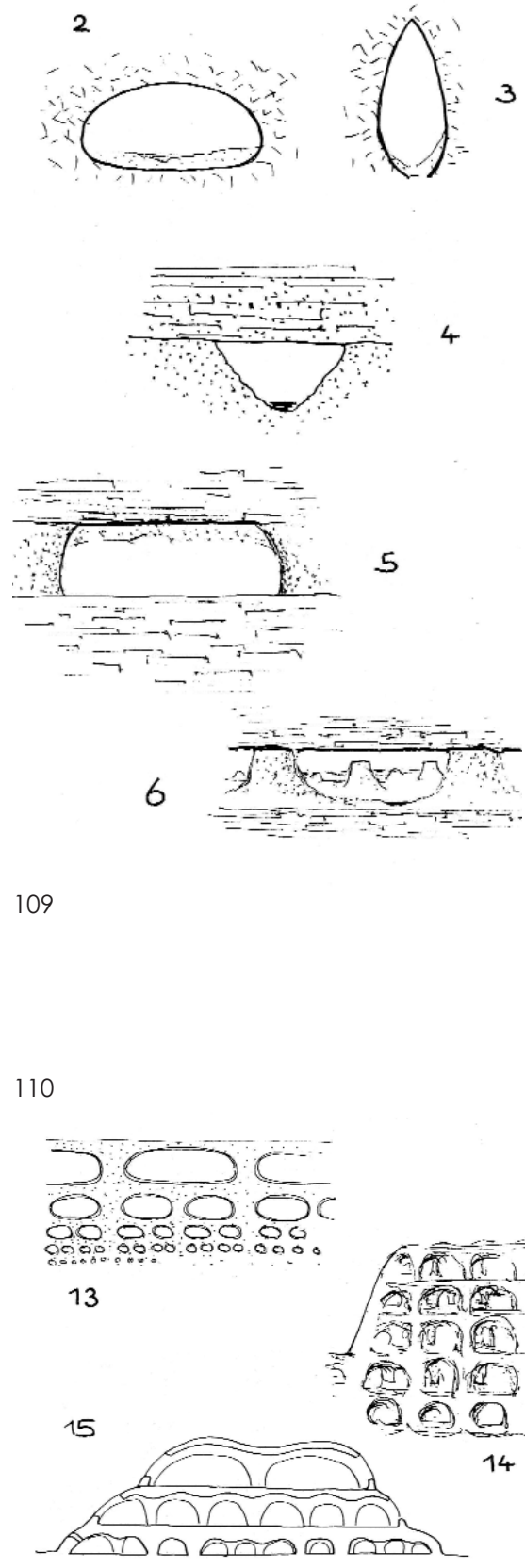
V.2.3.2 Cavidades.

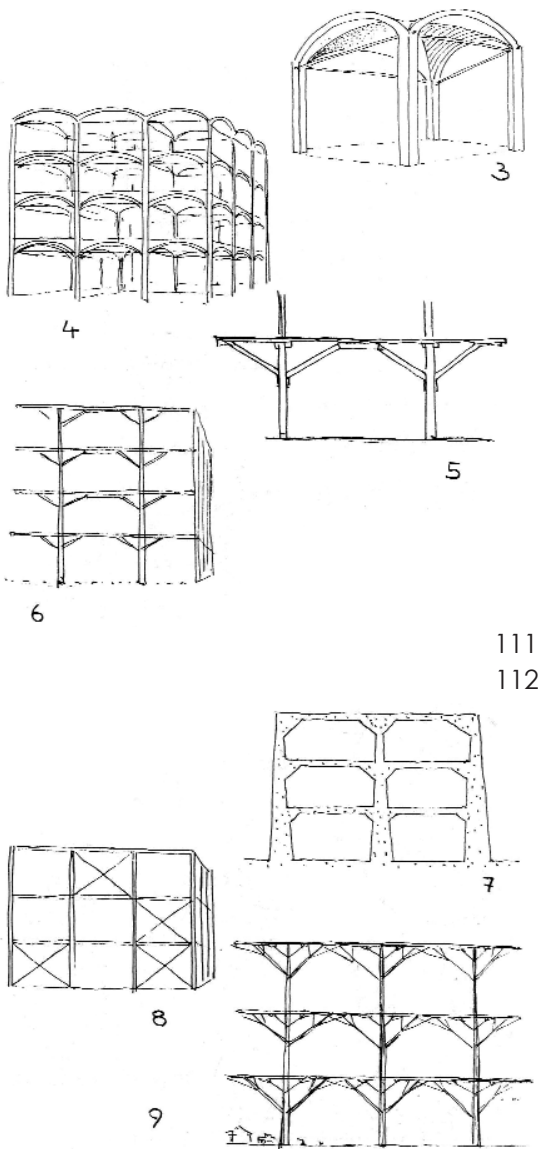
En la clasificación se incluyen dentro de esta categoría de las estructuras tridimensionales tanto las cavidades que se encuentran en la naturaleza inanimada como los espacios excavados o las construcciones levantadas por el hombre.

Así se señala la gran diversidad de formas que se encuentran en los diferentes tipos de cavidades de la naturaleza inanimada tales como simas, grietas, túneles o cavidades abovedadas, dependiendo su forma en gran medida de los diferentes tipos de rocas y de los procesos de formación, que pueden ser por erosión del agua, por tensiones térmicas o por flujos de lava.

La clasificación muestra algunas secciones transversales de formas típicas que se podrían distinguir. Por ejemplo la sección de la figura 109.2 sería la que predominaría en roca firme y a gran profundidad, mientras que la sección de la figura 109.3 predominaría en roca más porosa y floja. Las secciones de las figuras 109.4, 5, y 6 representan las cavidades con techos horizontales, que se dan cuando un estrato de roca dura descansa sobre otro de roca blanda y porosa, o cuando un estrato blando está situado entre dos duros, pudiendo en este caso llegar a estar soportado el techo incluso por pilares naturales.

La clasificación plantea que entre una montaña excavada (fig. 110.13) y las bóvedas de un edificio, prescindiendo del proceso de construcción, no hay desde el punto de vista estructural ninguna diferencia, ya que ambas estructuras son bóvedas. Se plantea también que incluso "montañas artificiales" de arcilla o piedra se podrían construir con la misma forma (fig. 110.14 y 15).





Así, con bóvedas de arista con zunchos perimetrales atirantados (fig. 111.3), éstas se podrían apilar casi a voluntad para poder construir formas tridimensionales de edificios que trabajen fundamentalmente a compresión (fig. 111.4). También se podría encontrar una forma similar de trabajo a compresión en estructuras de madera con sus típicas riostras diagonales de esquina o jabalcones (fig. 111.5 y 6).

Aparecen a continuación en la clasificación estructuras tridimensionales porticadas de varias plantas con techos soportados por vigas trabajando a flexión, bien de madera, bien de hormigón armado (fig. 112.7), señalando la importancia cada vez mayor de las acciones horizontales cuanto más ligera es la estructura, y el arriostramiento diagonal como un medio eficaz para contrarrestarlas (fig. 112.8). También se mencionan con relación a las estructuras de varias plantas y grandes luces las estructuras ramificadas¹³⁰ tridimensionales como unas de las más apropiadas para estos casos (fig. 112.9).

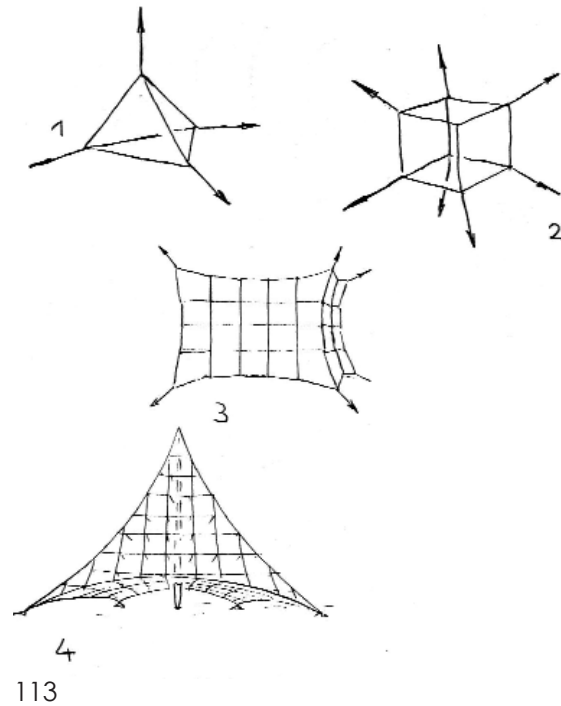
Fig. 111 Apilamiento de elementos modulares para producir formas edificadas tridimensionales. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 101

Fig. 112 Estructuras tridimensionales porticadas de varias plantas. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 101

¹³⁰ Este tipo de estructuras ha sido objeto de investigaciones en el Instituto de Estructuras Ligeras. Véase como muestra la publicación OTTO, F.: *Verzweigungen*. Konzepte SFB 230. Heft 46. Stuttgart, 1995.

V.2.3.3. Redes tridimensionales traccionadas.

Estas estructuras se componen de elementos unidimensionales tales como fibras, hilos y cables, pudiéndose encontrar en la naturaleza viviente bajo la forma de telarañas, mientras que en el ámbito de la técnica se presentan como redes de cables pretensados formadas por mallas geométricas (fig. 113.1, 2 y 3), para constituir estructuras reticulares de edificios que pueden soportar diferentes plataformas de pisos (fig. 113.4). La clasificación también incluye en esta categoría a los mástiles atirantados de los barcos veleros y de las antenas emisoras.



V.2.3.4. Estructuras neumáticas.

Son, por regla general, objetos huecos tridimensionales trabajando principalmente a tracción. Forman un sistema (fig. 114.9) constituido por una piel (H) resistente sólo a tracción, y un relleno (F), encontrándose ambos, piel y relleno, inmersos en un medio (M). Desde el interior pueden estar sometidos a una sobrepresión (fig. 114.10), o también a un vacío o una presión inferior a la exterior (fig. 114.11). Pueden ser completamente cerrados como un balón (fig. 114.12), o también abiertos como un globo de aire caliente (fig. 114.13). Los medios en los que las estructuras neumáticas se encuentran con más frecuencia son el aire y el agua, mientras que los rellenos más frecuentes son aire, agua, gases, tierra o material granular a granel.

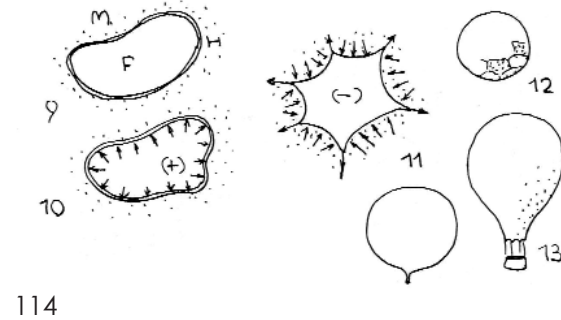


Fig. 113 Redes tridimensionales traccionadas. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 102

Fig. 114 Estructuras neumáticas. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 102

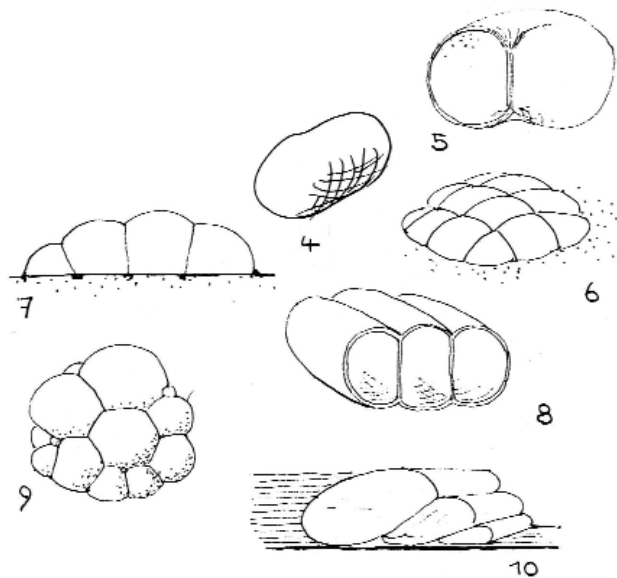
La membrana envolvente de las estructuras neumáticas a menudo está reforzada por redes (fig. 115.4). El interior puede estar atravesado por elemen-

Fig. 115 Estructuras neumáticas simples y compartimentadas. Dibujos de Frei Otto. Fuente: IL 23 pág. 103

tos unidimensionales atirantados (fig. 115.5), como en una sala neumática con red exterior y tensores interiores (fig. 115.6 y 7). El interior de las estructuras neumáticas puede estar también compartimentado por membranas (fig. 115.8). La espuma de jabón o el cúmulo de burbujas de jabón (fig. 115.9) son ejemplos típicos de estructuras neumáticas compartimentadas. Tanto las estructuras neumáticas simples como las compartimentadas pueden estar llenas de líquido. Así un tubo compartimentado lleno de agua podría utilizarse como presa o dique (fig. 115.10). F115

Por último también se señala dentro de esta categoría de la clasificación la posibilidad de que las estructuras neumáticas se endurezcan, como cuando actúan de encofrado para verter sobre ellas una masa de hormigón que dé lugar a una cáscara o estructura laminar. La estructura neumática endurecida aparece también con frecuencia en la naturaleza viviente. La clasificación señala como ejemplos la madera, los huesos, los huevos de pájaros o los caparzones de los microorganismos.

115



V.2.4. Otras estructuras.

La clasificación de las estructuras que propone Frei Otto desde el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart plantea que los criterios de forma, tipo de acción y tipo de tensión no son suficientes para abarcar todas las estructuras o todos los fenómenos de la transmisión de fuerzas. Con el fin de dar una visión lo más completa posible se mencionan una serie de ejemplos que representan algunos de estos fenómenos.

Las partículas de gases o de líquidos proyectadas a alta velocidad contra cuerpos sólidos son uno de estos ejemplos que se pueden considerar como estructuras portantes.

También los gradientes de presión que se crean alrededor de las alas de los aviones o las hélices de los barcos y los aviones posibilitan la transmisión de fuerzas al material circunstante, a condición de que las masas estén en movimiento. Los imanes, que pueden ser objetos uni-, bi- o tridimensionales, son capaces de transmitir fuerzas de forma inmaterial a través del aire o incluso del vacío.

Los campos magnéticos y sus líneas de flujo se pueden considerar como sollicitaciones uniaxiales de tracción o como sollicitaciones uniaxiales de compresión dentro de un campo tridimensional.

Los sistemas solares, la tierra, la luna, el sol y los planetas también se consideran estructuras estables, y sin embargo en movimiento, sujetas a fuerzas de atracción mutua. Las masas de los astros giran unas alrededor de otras en órbitas estables contra-

restandose la fuerza centrífuga con la fuerza de atracción. La transmisión de fuerza entre dos cuerpos celestes con solicitaciones de tracción uniaxial también es inmaterial.

El transporte de fuerza y/o energía mediante las ondas de la luz a través del vacío del universo a lo largo de distancias ilimitadas se produce de forma virtualmente inmaterial. En particular, el laser es una tecnología que permite aprovechar las posibilidades de transportar energía y fuerza por medio de la luz.

La posibilidad de transportar fuerza y energía eléctrica mediante conductores eléctricos es otro ejemplo de los fenómenos de la transmisión de fuerzas que se podría considerar aparte de los criterios de forma y tipo de solicitación.

Los átomos son sistemas estructurales muy estables y resistentes a tracción y a compresión en cuyo interior actúan grandes fuerzas. Utilizando medios normales tan solo muy poco o nada se pueden comprimir, y por otro lado tampoco es posible someterlos a tracción. Sólo cuando los átomos forman uniones moleculares mayores se puede someter un material a tracción, y se puede aprovechar una parte, generalmente una parte muy reducida, de la resistencia de los átomos.

V.2.5. Estructuras de la naturaleza.

En consonancia con el planteamiento globalizador de la clasificación de las formas, este intento de ordenar y sistematizar el mundo de las estructuras pretende no excluir ninguna posibilidad, abarcando toda la infinita diversidad de objetos capaces de transmitir fuerzas y momentos. Por ello, y tal como veíamos ya en la primera clasificación de estructuras de 1963 / 1964, se incluyen también en esta clasificación de 1992 las estructuras de la naturaleza, incorporando importantes investigaciones realizadas en este ámbito durante el periodo de tiempo transcurrido entre esos años, auspiciadas por el programa específico de investigación del gobierno alemán centrado en ese mismo tema: "*Natürliche Konstruktionen*" (estructuras naturales)¹³¹.

Al igual que en la clasificación de las formas, los procesos de formación de los objetos han sido también otro criterio básico para la sistematización de las estructuras. Siguiendo pues el orden cronológico de la historia natural se distinguen los siguientes grupos como grandes procesos consecutivos de generación de estructuras en la naturaleza: las estructuras de la naturaleza inanimada, las de la naturaleza animada, las de la naturaleza muerta y las estructuras de los animales.

¹³¹ Es importante mencionar una publicación del Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart con aportaciones de diferentes colaboradores del mismo, como precursora de este programa de investigación y exponente de las investigaciones realizadas en este ámbito: A.A.V.V.: *Natürliche Konstruktionen. Formen und Strukturen in Natur und Technik und Prozesse ihrer Entstehung*. Deutsche Verlags-Anstalt. Stuttgart, 1982.

V.2.6. Estructuras de la técnica humana.

Particular atención recibe en este intento de sistematización de todos los objetos capaces de transmitir fuerzas precisamente aquéllos que son fruto de la técnica desarrollada por el hombre. Si la naturaleza animada ha tenido en la tierra una fuerte influencia sobre la naturaleza inanimada, no menos importante ha sido la influencia del hombre sobre la naturaleza en su conjunto desde su aparición en la tierra, y muy especialmente en las últimas décadas. Aparte de las obras de mayor escala, en su mayor parte de la ingeniería civil, tales como carreteras, ferrocarriles, canales, obras hidráulicas, la minería, la agricultura o la ingeniería de montes, que han afectado en mayor medida a la naturaleza inanimada, la casa y la ciudad son estructuras creadas por la técnica del hombre que, en la visión de Frei Otto, forman, con todos sus elementos, sistemas ecológicos propios con una relación de dependencia de la naturaleza animada e inanimada que la rodea. A este respecto se señala el cambio experimentado por la casa y la ciudad en esta relación con su entorno desde sus orígenes o en sus expresiones más vernáculas, en las que, aunque se buscaba la protección de la naturaleza, estaban impregnadas de las condiciones naturales, mientras que en la casa moderna se pierde con frecuencia esta relación al no influir en ella elementos como los materiales locales, el clima o el lugar, convirtiéndose en una abstracción técnica.

Las estructuras de las obras de construcción, es decir, las estructuras de la técnica humana de mayor escala que en mayor medida afectan a la naturaleza animada e inanimada, son pues las que son obje-

to de este esfuerzo de sistematización en este apartado de la clasificación. El criterio básico para la ordenación aquí ha sido el de los materiales, siguiendo la secuencia cronológica de su evolución. Es un criterio muy frecuente y evidente en las clasificaciones de estructuras, por lo que esta sistematización de Frei Otto, en lo que al área de estructuras de obras de construcción se refiere, se podría considerar como una extensión de las clasificaciones más habituales de este tipo de estructuras.

Las categorías empleadas en este apartado de la sistematización de estructuras de Frei Otto son las siguientes:

- Estructuras realizadas con hierbas, bambú, varas de madera, rollizos de madera y vigas.
- Estructuras macizas de tierra y piedra.
 - Estructuras de barro.
 - Estructuras de ladrillo.
 - Estructuras de piedra natural.
 - Arcos y bóvedas.
 - Estructuras de hormigón.
- Estructuras de hormigón armado.
- Estructuras metálicas.
- Estructuras de metales ligeros.
- Estructuras de fibras, alambres, tejidos y plásticos.
Estructuras traccionadas.
 - El puente colgante pretensado.
 - Mástiles y vigas atirantados y arriostrados.
 - Cubiertas colgantes y tiendas.

- Membranas pretensadas.
 - Banderas, velas, alas, paracaídas.
 - Globos, estructuras neumáticas, naves neumáticas y depósitos.
- Estructuras de plástico.

VI. Frei Otto y la catalogación de nuevos tipos estructurales como exploración gráfica y experimental de nuevas combinaciones y relaciones

El afán de catalogación y sistematización como instrumento para explorar nuevas posibilidades de diseño, como estímulo para la creatividad y como punto de partida para nuevos tipos estructurales.

Esta necesidad de tener una visión de conjunto del mayor número de posibilidades dentro del campo de las estructuras parece que entre en contradicción con una actividad creadora capaz de imaginar nuevos tipos estructurales, de traspasar los límites de lo ya conocido, de lo ya establecido. Sin embargo veremos cómo esa necesidad de sistematizar y ordenar el mundo de las estructuras no representa un esquema rígido que coarte la creatividad al tener que referir a él toda nueva idea, sino más bien un mapa que señala nuevos campos todavía inexplorados, un torrente de nuevas posibilidades que se plantean a partir de unos criterios ordenadores que contribuyen a ubicar y delimitar conceptos y sistemas.

Tal como hemos señalado anteriormente, la clasificación de 1963 / 1964 ya presenta, como una de las novedades más sugerentes, la inclusión no sólo de los sistemas estructurales constructivos, sino también los sistemas estructurales técnicos y naturales, además de sistemas estructurales inmateriales, en los que se contemplan acciones energéticas inmateriales capaces de transmitir esfuerzos, como las atracciones y repulsiones. También se consideraban en esta clasificación materiales de forma no estable, como los líquidos y los gases, cada vez más utilizados. Los criterios utilizados y la ordenación gráfica de la clasificación permiten deducir nuevos sistemas o tipos estructurales, hasta entonces desconocidos o de uso poco frecuente, y

otros cuya significación cabe situarla más bien en el campo teórico (por ejemplo: sistemas estructurales tridimensionales, triaxiales, sometidos a tracción y compuestos por elementos en estado sólido).

La exploración gráfica y experimental de nuevos universos de formas y estructuras recién descubiertos. La búsqueda de nuevas combinaciones y relaciones.

Cuando Frei Otto emprende la investigación de una nueva forma constructiva elemental, crea en pocos días varios centenares de esquemas de sistemas estructurales, en los cuales se pueden apreciar todas las adiciones, combinaciones y variaciones posibles. Los sistemas constructivos no se estudian nunca aisladamente y siempre se establecen comparaciones con otros sistemas, de lo que nacen, a menudo, nuevas y sorprendentes combinaciones¹³².

De esta manera Frei Otto construye un lenguaje propio de formas estructurales que en realidad es una serie de sistemas generadores de formas, interrelacionados, basados en procesos estructurales. Es un sistema abstracto que constituye una forma particular de ver el juego de acción y reacción de fuerzas dentro de un sistema estructural, con vistas a optimizar el esquema de fuerzas y por tanto la forma de la estructura, con el fin de eliminar todo material extraño. Una buena parte

¹³² Véase ROLAND, C.: *Frei Otto: Estructuras*. Gustavo Gili. Barcelona, 1973 (1965). Pág. 1.

de los esfuerzos de Frei Otto han sido dedicados a construir un diccionario de formas estructurales – en realidad sus libros parecen diccionarios – un equivalente a los lenguajes de patrones de Christopher Alexander¹³³. El sistema generador de sistemas de la forma estructural planteado por Frei Otto no es un sistema único, sino una serie de sistemas entrelazados. Su pensamiento estructural está organizado por un complejo de sistemas generadores de sistemas entrelazados.

Es importante realizar un recorrido por los catálogos de algunos de estos sistemas estructurales siguiendo el pensamiento de Frei Otto a través de sus croquis y de los principios ordenadores que dan lugar a unas exploraciones de formas y estructuras ricas en variaciones, combinaciones y posibilidades. Serán en todo caso un instrumento para rastrear el discurso creativo de una poderosa imaginación en busca de la forma resistente.

¹³³ Véase ALEXANDER, C.: *Un lenguaje de patrones*. Gustavo Gili. Barcelona, 1980 (1977).

VI.1. Las estructuras de redes.

Los sistemas estructurales cuyo principal componente son redes de cables han sido objeto de diferentes intentos de sistematización y catalogación a lo largo de sucesivos textos de Frei Otto. El primero de ellos, su tesis doctoral, publicada en 1954 con el título "*Das hängende Dach*¹³⁴", traducido al castellano en 1958 con el título *Cubiertas colgantes*¹³⁵, ya presenta en su índice principios y criterios de ordenación de las estructuras colgantes, entre las cuales se encuentran las estructuras de redes. Estos criterios ordenadores fueron afinados y elaborados en mayor profundidad en dos publicaciones posteriores¹³⁶, para encontrar un desarrollo más exhaustivo y monográfico en el libro titulado *Netze in Natur und Technik*¹³⁷ (Redes en la naturaleza y en la técnica), el número 8 de la serie *Mitteilungen* del Instituto de Estructuras Ligeras (IL), publicado en 1975. En el análisis de la catalogación de este sistema estructural nos basaremos principalmente en este último texto.

Como estructuras de redes se entienden aquellas estructuras en las que las redes son una parte sustancial de la estructura completa. Por otro lado técnicamente hablando una red es una estructura superficial de mallas resistente a tracción y flexible.

¹³⁴ OTTO, F.: *Das hängende Dach*. Bauwelt Verlag. Berlin, 1954.

¹³⁵ OTTO, F.: *Cubiertas colgantes*. Labor. Madrid, 1958.

¹³⁶ OTTO, F.: *Zugbeanspruchte Konstruktionen*. Tomo II. Verlag Ullstein. Frankfurt-Berlín, 1966., y también ROLAND, C.: *Frei Otto: Spannweiten*. Verlag Ullstein. Frankfurt-Berlín, 1965. (Este último fue traducido al castellano con el título *Frei Otto: Estructuras* y publicado en España por la editorial Gustavo Gili en 1973.

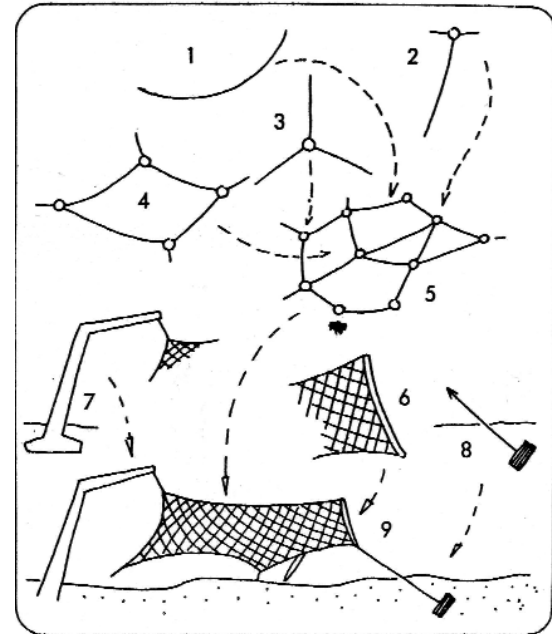
¹³⁷ A.A.V.V.: *Netze in Natur und Technik*. Institut für leichte Flächentragwerke. Stuttgart, 1975.

VI.1.1. Categorías de la clasificación

En la sistematización de estas estructuras de redes Frei Otto utiliza las siguientes categorías:

Elementos estructurales:

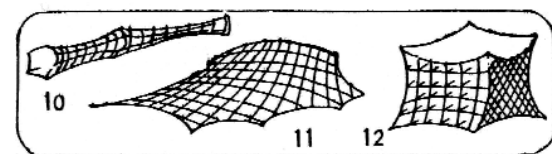
1. Red (fig. 116.5).
 - 1.1. Cable (fig. 116.1).
 - 1.2. Punto de suspensión (fig. 116.2).
 - 1.3. Nudo (fig. 116.3).
 - 1.4. Malla (fig. 116.4).
2. Borde (fig. 116.6).
3. Soporte (fig. 116.7).
4. Anclaje (fig. 116.8).



116

Forma:

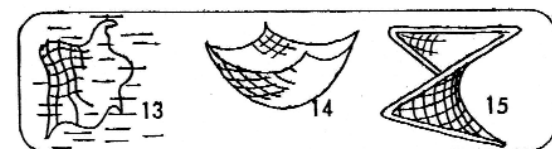
1. Unidimensionales (fig. 117.10).
2. Bidimensionales (fig. 117.11).
3. Tridimensionales (fig. 117.12).



117

Fuerzas internas:

1. Sin tensión (por ejemplo flotantes) (fig. 118.13).
2. Libremente suspendidas (fig. 118.14).
3. Pretensadas (fig. 118.15).



118

Fig. 116. Elementos de las estructuras de redes. Fuente: IL 8 pág. 10

Fig. 117. Formas de estructuras de redes. Fuente: IL 8 pág. 10

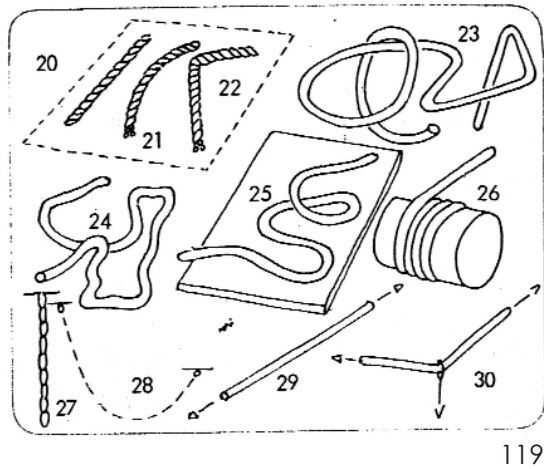
Fig. 118. Fuerzas internas en estructuras de redes. Fuente: IL 8 pág. 10

VI.1.2. Elemento de red "cable".

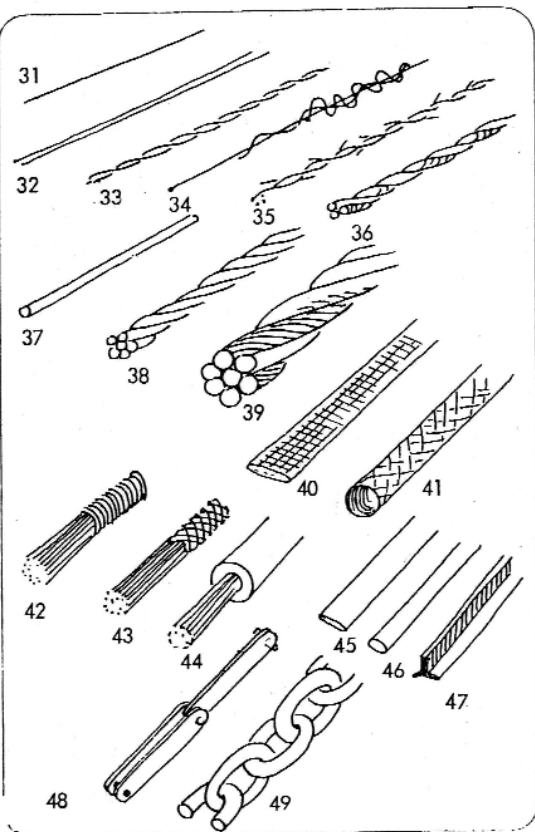
Forma.

Los cables pueden ser rectos (fig. 119.20), curvados en un plano (fig. 119.21), quebrados (fig. 119.22), curvados o quebrados en el espacio (fig. 119.23). La forma queda determinada por influencias externas o por fuerzas internas. Cables no tensados (fig. 119.24), por ejemplo flotando en el agua, no tienen forma duradera. Cables que yacen sueltos (fig. 119.25) quedan conformados por la base sobre la que reposan, y cables arrollados (fig. 119.26) por el rollo. Los cables suspendidos son rectos (fig. 119.27) o curvados (fig. 119.28); los cables fuertemente tensados son rectos (fig. 119.29), y bajo la acción de cargas puntuales quebrados (fig. 119.30).

Tipos de cables. (fig. 120)



119



120

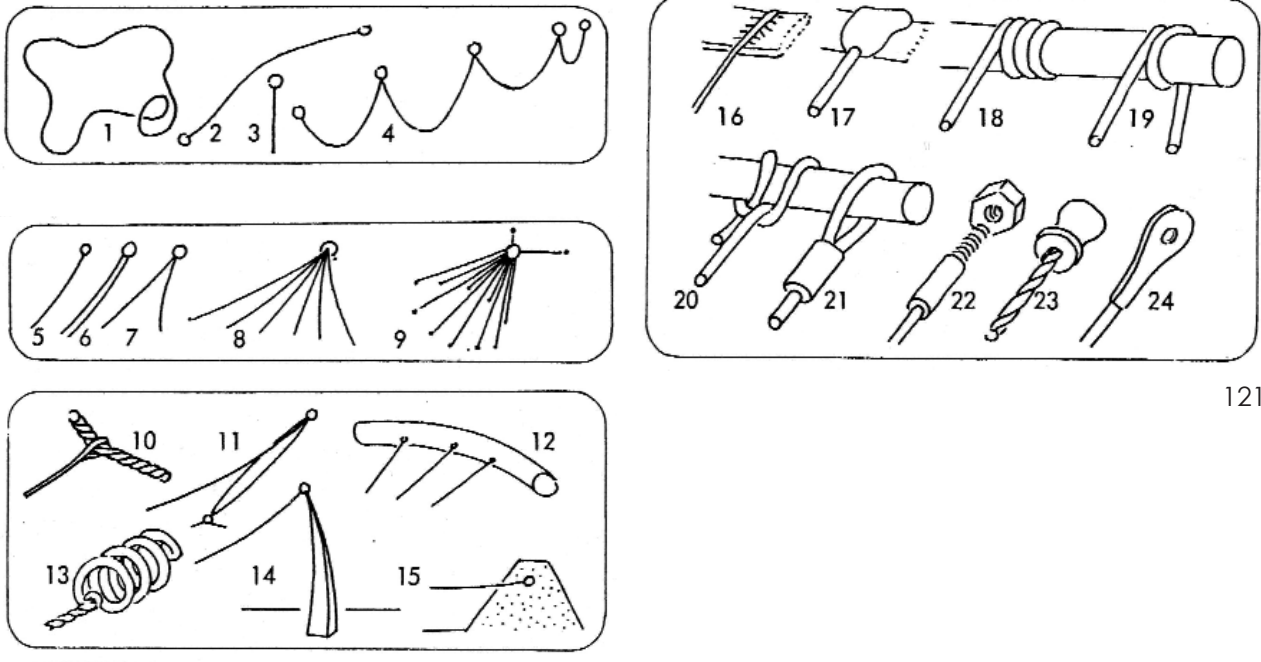
Fig. 119. Formas de cables. Fuente: IL 8 pág. 11

Fig. 120. Tipos de cables. Fuente: IL 8 pág. 11

Fig. 121. Puntos de suspensión. Fuente: IL 8 pág. 12

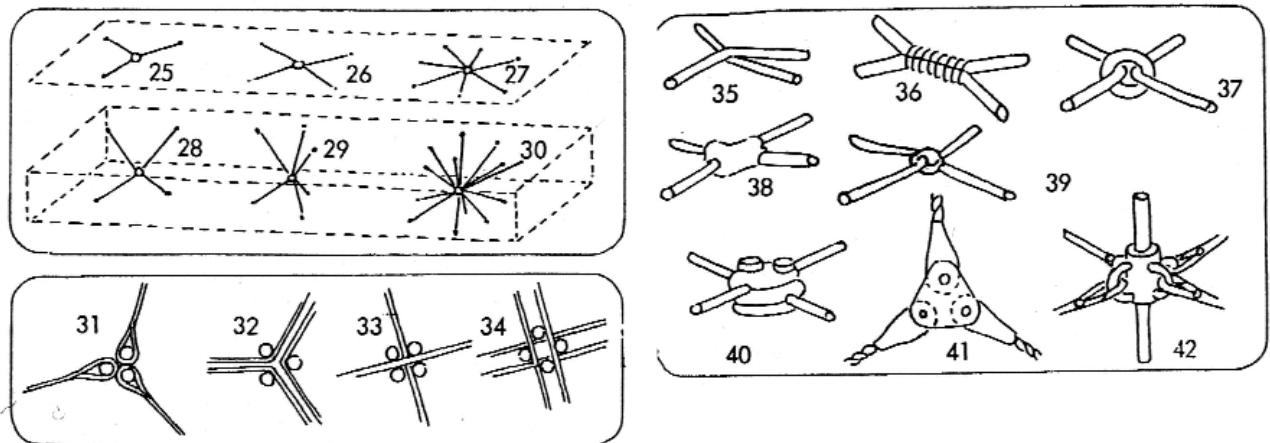
Fig. 122. Nudos. Fuente: IL 8 pág. 12 y 13.

VI.1.3. Elemento de red "punto de suspensión". (fig.121)



121

VI.1.4. Elemento de red "nudo". (fig.122)



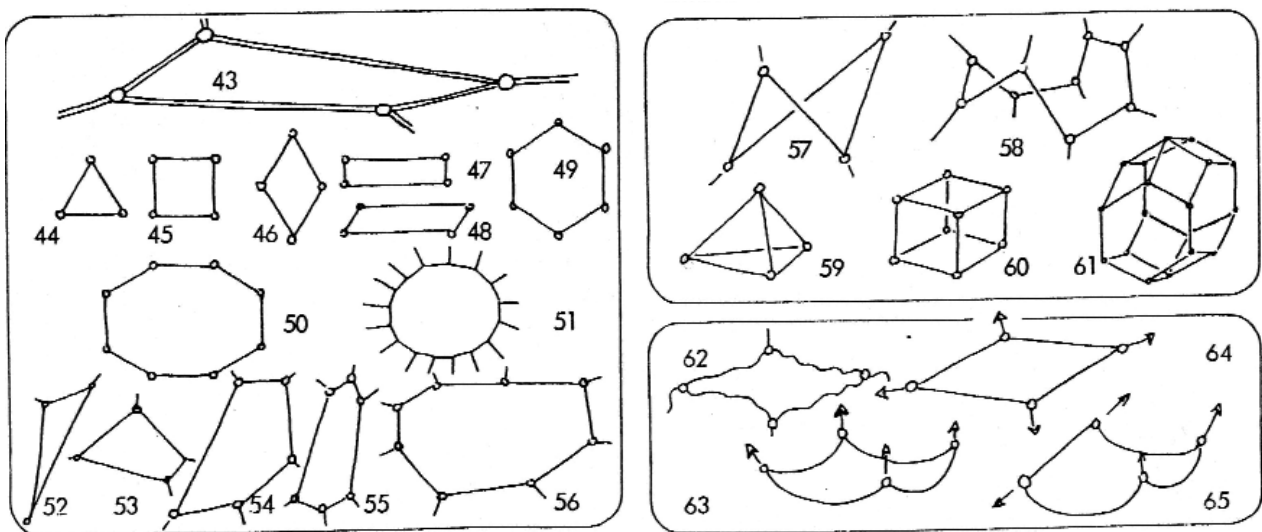
122

Fig. 123. Mallas. Fuente: IL 8 pág. 13 VI.1.5. Elemento de red "malla".

La malla se entiende aquí como una composición de cables y nudos para formar formas lineales cerradas (fig. 123.43). Las mallas pueden ser planas (fig. 123.44-56) o pueden no estar contenidas en un mismo plano (fig. 123.57-58). Varias mallas se pueden combinar para formar mallas tridimensionales (fig. 123.59-61) de diferentes configuraciones, regulares o irregulares.

La tensión de la red influye en la forma de las mallas, desde la malla sin tensión en los cables (por ejemplo yaciendo sobre el suelo) (fig. 123.62); la malla colgada cuyos cables, traccionados tan solo por el peso propio, adoptan la forma de arcos (fig. 123.63); la malla de cables rectos pretensados (fig. 123.64), y finalmente la combinación de cables rectos tensados y cables flojos curvados en una misma malla (fig. 123.65).

123

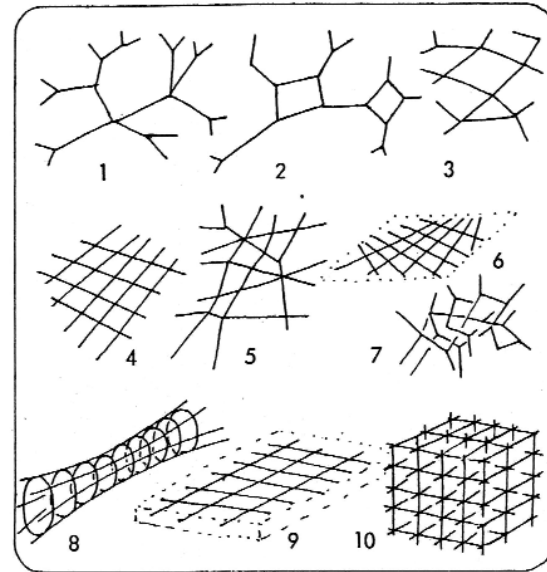


VI.1.6. Elemento estructural "red".

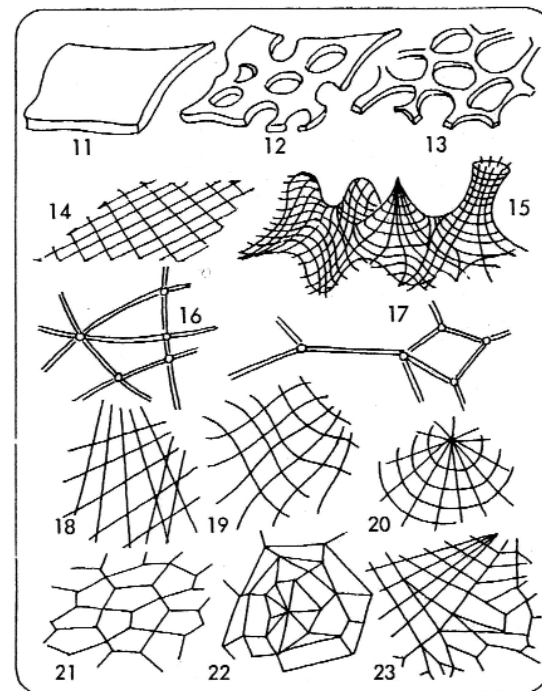
Tipos de redes.

Las redes se distinguen entre sí tanto por el tipo de disposición de la malla (fig. 124.4-7), como por la forma global de la red (fig. 124.8-10). Las mallas pueden ser regulares (fig. 124.4) o irregulares (fig. 124.5), superficiales (fig. 124.6) o espaciales (fig. 124.7). La forma global de la red puede ser unidimensional (fig. 124.8), bidimensional (fig. 124.9) y tridimensional (fig. 124.10).

Las redes superficiales pueden estar formadas tanto por cables y nudos como por membranas perforadas (fig. 125.12-13). La superficie de la red puede ser plana (fig. 125.14) o curvada de diferentes maneras (fig. 125.15). Además las líneas de los cables pueden atravesar los nudos sin perder su continuidad (fig. 125.16), o terminar, o bien bifurcarse en ellos (fig. 125.17). Los cables continuos pueden ser rectos (fig. 125.18), curvados (fig. 125.19), o rectos y curvados, como en el caso de las redes radiales (fig. 125.20). Las redes con cables no continuos (fig. 125.21 y 22) se pueden combinar con redes con cables continuos (fig. 125.23).



124



125

Fig. 124. Tipos de redes. Fuente: IL 8 pág. 14

Fig. 125. Redes superficiales. Fuente: IL 8 pág. 14

Estructura de malla de la red

1. Redes planas o desarrollables. (fig. 126)

1.1. Redes de mallas regulares. (fig. 127)

1.2. Redes regulares radiales. (fig. 128)

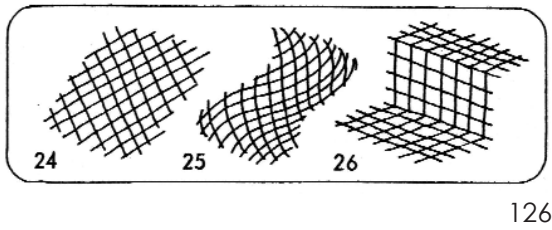
1.3. Redes con mallas irregulares. (fig. 129)

1.4. Formas aditivas. (fig. 130)

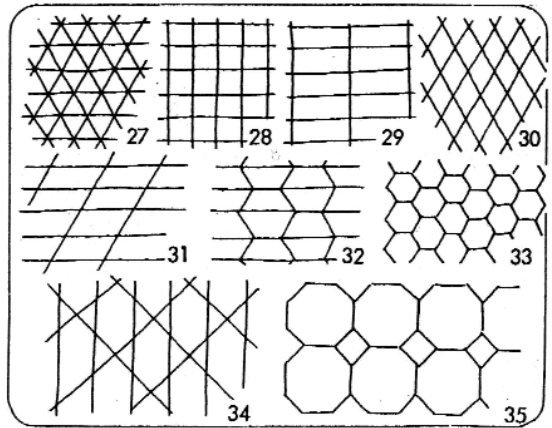
2. Redes espacialmente curvadas o de doble curvatura.

Son superficies no desarrollables, a diferencia de las superficies de simple curvatura (fig. 131.1-2). Las superficies de doble curvatura pueden ser en forma de cúpulas (sinclásticas) (fig. 131.3), y en forma de silla de montar (anticlásticas) (fig. 131.4). Pueden presentar discontinuidades puntuales o lineales, tales como picos (fig. 131.5) y crestas (fig. 131.6).

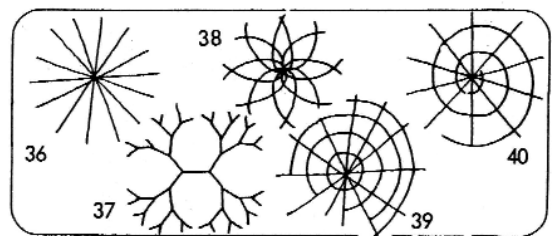
Se puede producir por adición una gran variedad de redes (fig. 132.18 y 19) a partir de mallas triangulares, rectangulares, hexagonales y octogonales. En el caso de redes radiales el centro se encuentra generalmente en los picos de la superficie. La superficie puede ser cónica (fig. 132.20), sinclástica (fig. 132.21) o anticlástica (fig. 132.22). Los cables circundantes pueden disponerse formando anillos (fig. 132.20-22) o espirales (fig. 132.23). Por medio de redes radiales se pueden formar también picos y depresiones en una misma red (fig. 132.24).



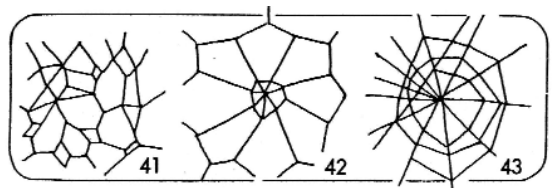
126



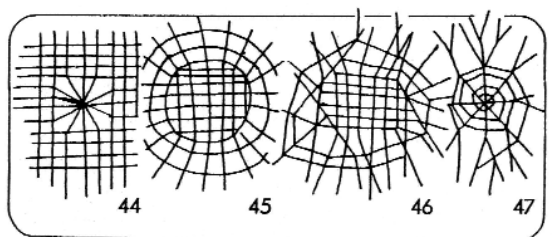
127



128



129

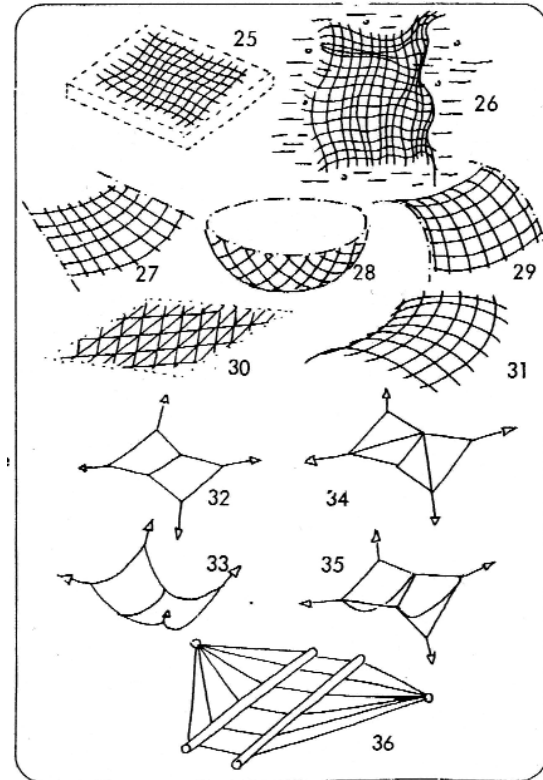


130

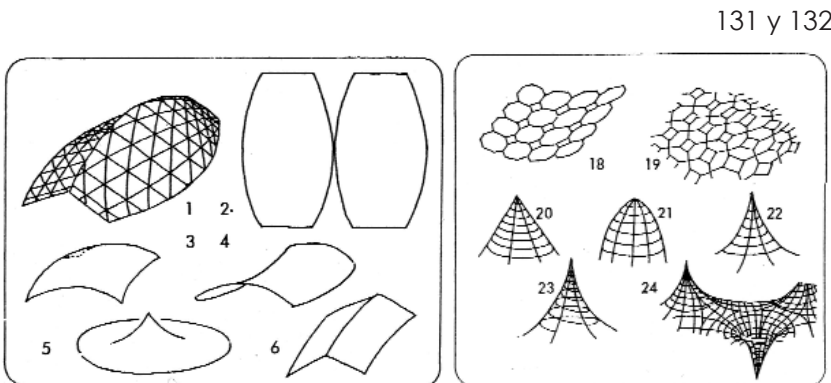
3. Efecto de las fuerzas sobre la forma de la estructura de malla.

Las redes no tensadas pueden estar tendidas sobre una base plana (fig. 133.25), pueden girar libremente en el espacio o flotar en el agua (fig. 133.26). Estas redes son inestables. Sólo cuando están traccionadas adquieren su forma. Las redes de cables libremente suspendidas (sin tensiones previas) pueden formar superficies de simple o doble curvatura, sinclásticas o anticlásticas (fig. 133.27-29). Las redes pretensadas pueden ser planas (fig. 133.30) o anticlásticas (fig. 133.31), pero no sinclásticas, a no ser que sean redes tensadas neumáticamente.

Las fuerzas externas influyen sobre la forma de la malla. La red pequeña que se compone de dos mallas puede ser pretensada (fig. 133.32) y libremente suspendida (fig. 133.33). Las redes con mallas cuadradas y hexagonales generalmente tienen una distribución de tensiones más homogénea que las redes de mallas triangulares (fig. 133.34), en las que se pueden dar cables pretensados (rectos) y cables no pretensados (colgantes) (fig. 133.35). Si se añaden barras comprimidas a la red (fig. 133.36), aquéllas afectan la forma de ésta.

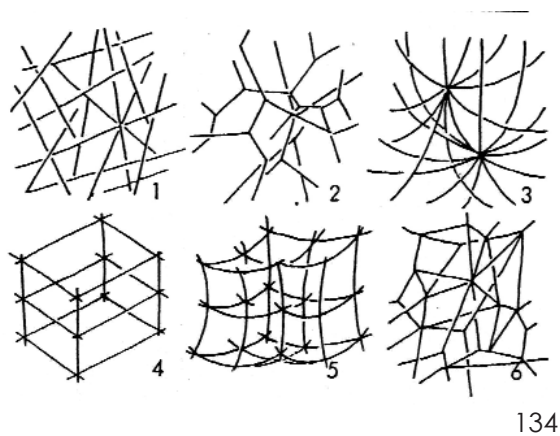


133



131 y 132

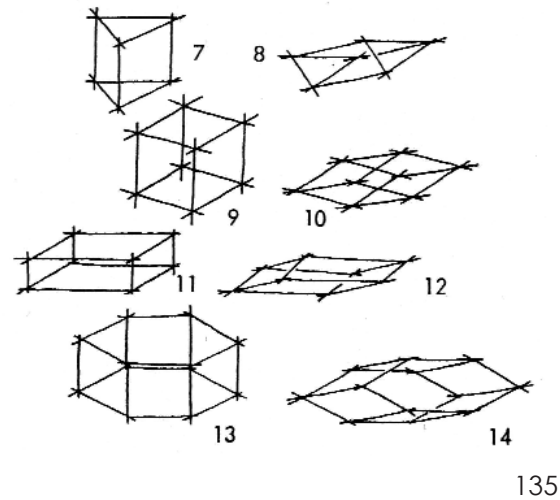
Fig. 126. Redes planas o desarrollables. Fuente: IL 8 pág. 15
 Fig. 127. Mallas regulares. Fuente: IL 8 pág. 15
 Fig. 128. Redes regulares radiales. Fuente: IL 8 pág. 15
 Fig. 129. Mallas irregulares. Fuente: IL 8 pág. 15
 Fig. 130. Formas aditivas. Fuente: IL 8 pág. 15
 Fig. 131. Redes desarrollables (1-2) y redes de doble curvatura. Fuente: IL 8 pág. 16
 Fig. 132. Combinaciones de mallas regulares. Redes radiales. Fuente: IL 8 pág. 17
 Fig. 133. Efecto de las fuerzas sobre la forma de la estructura de malla. Fuente: IL 8 pág. 17



134

4. Estructuras de malla de redes tridimensionales.

Las redes espaciales pueden estar formadas por cables que no se tocan (fig. 134.1), y que por lo tanto no tienen nudos, o por cables que se tocan pero no tienen ninguna otra unión. Los cables y los nudos pueden formar ramificaciones o bifurcaciones (fig. 134.2 y 3), en las que las redes no presentan ninguna malla cerrada. En las redes de mallas cerradas dispuestas espacialmente los cables pueden ser continuos y rectos (fig. 134.4), curvados (fig. 134.5) o pueden estar dispuestos de forma discontinua a voluntad (fig. 134.6).

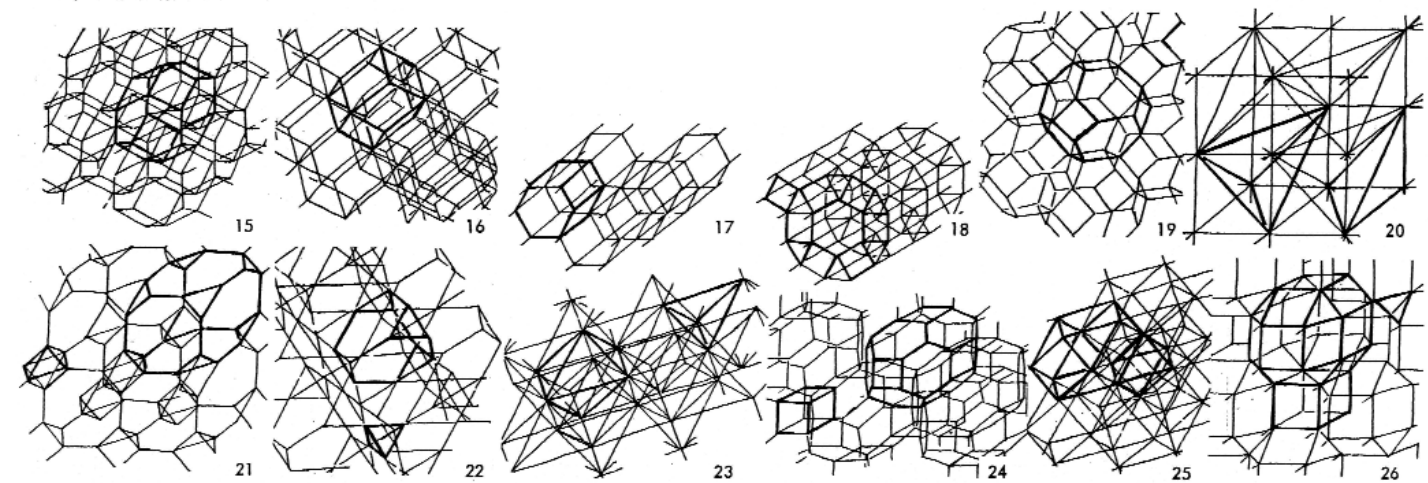


135

4.1. Redes de mallas regulares.

Son aquéllas cuya geometría se corresponde con las caras y las aristas de los cuerpos que pueden yuxtaponerse y apilarse sin dejar huecos entre sí, como por ejemplo los cubos, bloques, bloques de ángulos oblicuos (fig. 135.7, 9). Estos cuerpos se pueden deformar en todas las direcciones, como por ejemplo mallas cúbicas convertidas en bloques en forma de paralelepípedos de ángulos oblicuos o rectos (fig. 135.9 a 10, 11 a 12, 13 a 14).

136



4.2. Redes con disposiciones de malla radiales. (fig.137)

4.3. Influencia de las fuerzas externas e internas en la estructura de malla. (fig.138)

Fig. 134. Estructuras de malla de redes tridimensionales. Fuente: IL 8 pág. 18

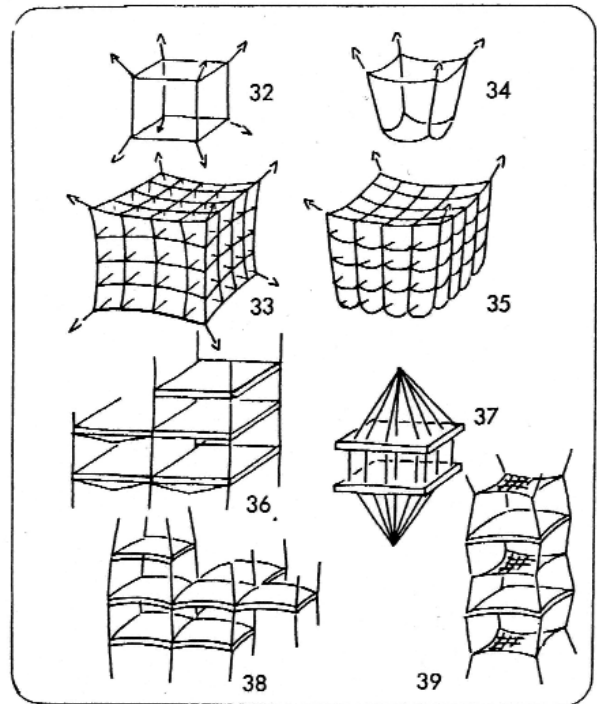
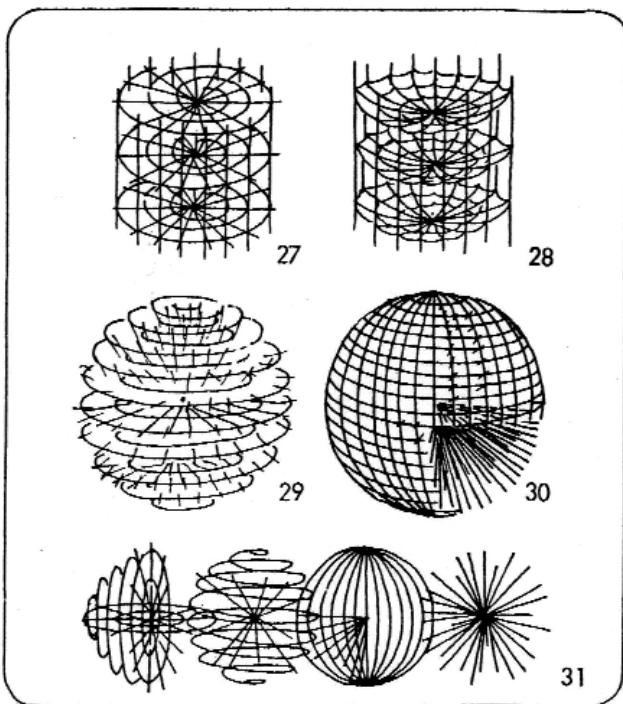
Fig. 135. Mallas espaciales regulares. Fuente: IL 8 pág. 18

Fig. 136. Redes de mallas espaciales regulares formando poliedros yuxtapuestos y apilados. Fuente: IL 8 pág. 18

Fig. 137. Redes con disposiciones de malla radiales. Fuente: IL 8 pág. 19

Fig. 138. Influencia de las fuerzas externas e internas en la estructura de malla. Fuente: IL 8 pág. 19

137 y 138

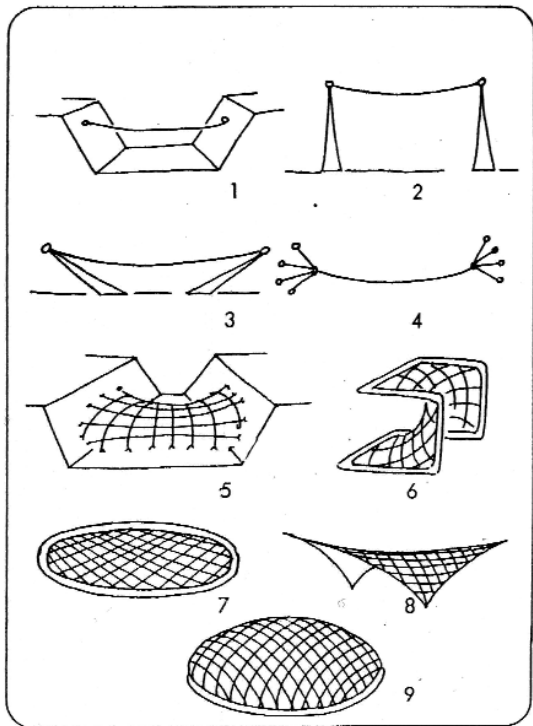


VI.1.7. Elemento estructural "borde de red".

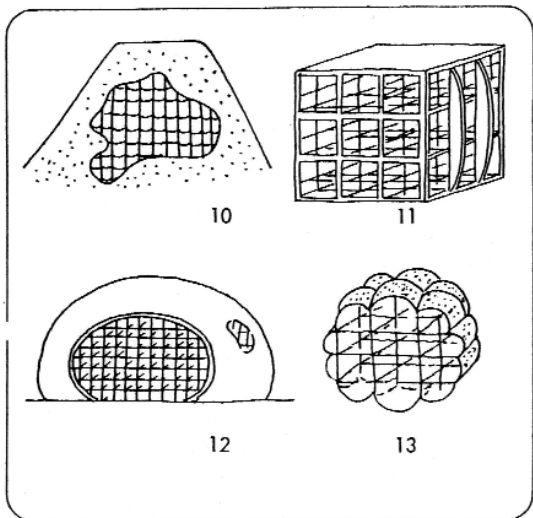
Cada cable de una red puede sujetarse en cuerpos de grandes volúmenes macizos (fig. 139.1), en barras trabajando a flexión (fig. 139.2), en barras comprimidas (fig. 139.3) y finalmente en otros cables (fig. 139.4). También las redes bidimensionales pueden estar formadas por bordes macizos (fig. 139.5), flexionados (fig. 139.6), comprimidos (fig. 139.7) y traccionados (fig. 139.8).

Las posibilidades que ofrecen las combinaciones de dos tipos de borde de red se muestran en la figura 140.

Los bordes de las redes espaciales o tridimensionales también pueden estar constituidos por grandes macizos (fig. 141.10), placas o celosías trabajando a flexión (fig. 141.11), cáscaras o bóvedas comprimidas (fig. 141.12), o elementos traccionados como redes de cables o membranas (fig. 141.13).



139 y 141



140

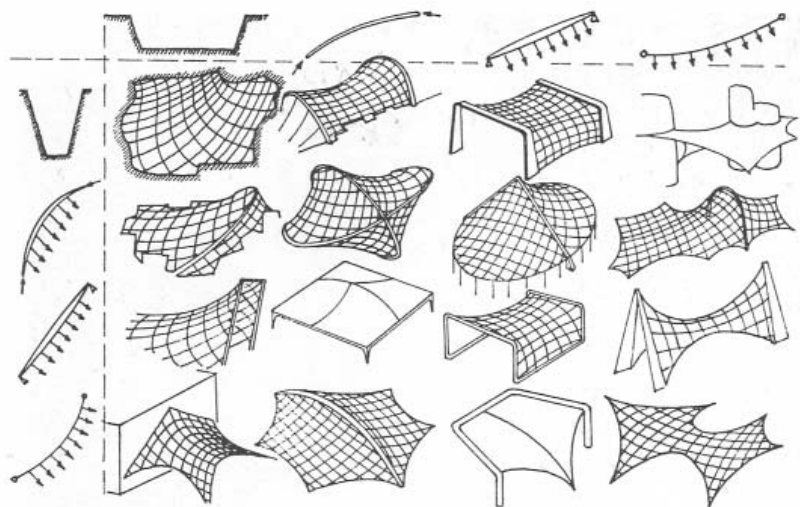
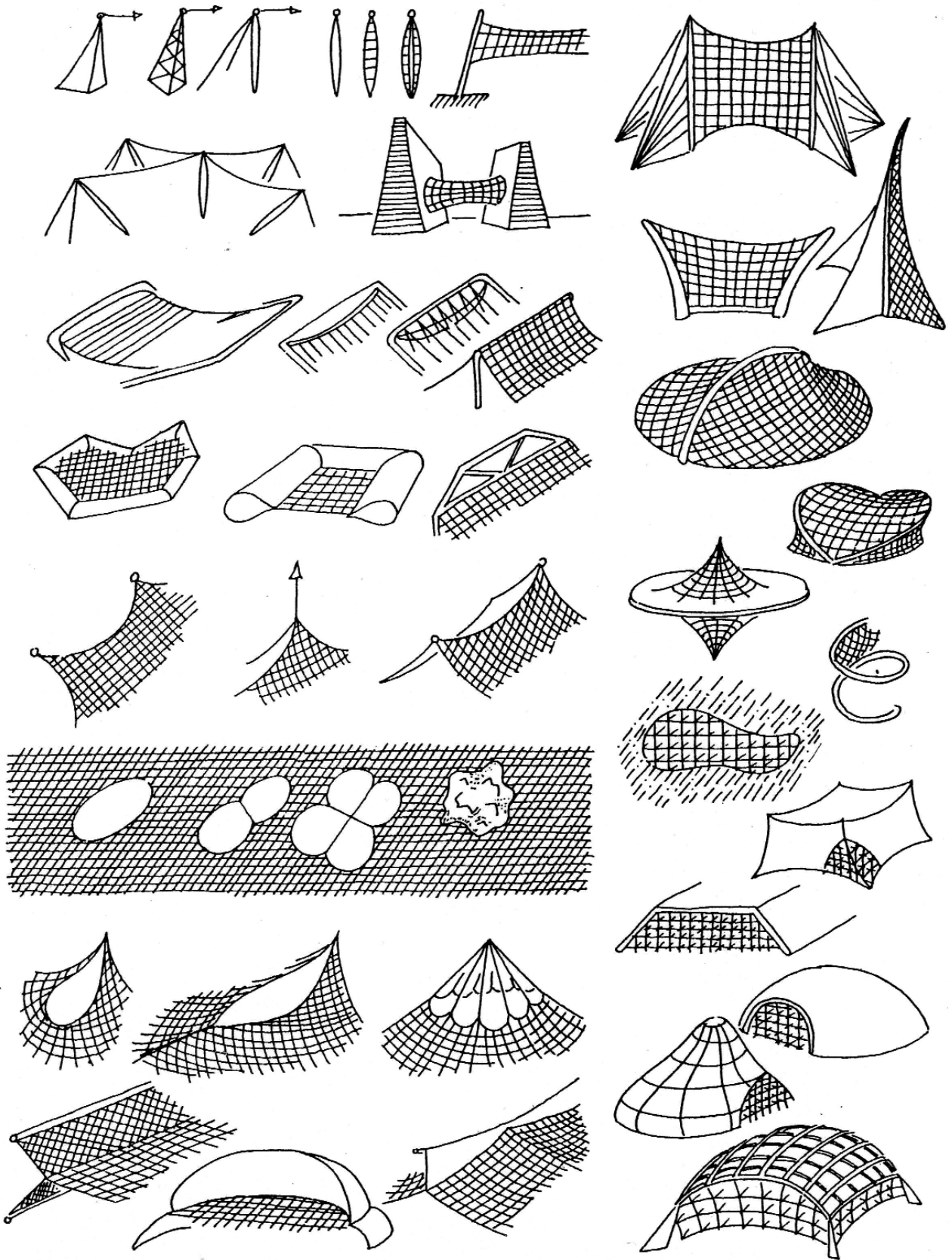
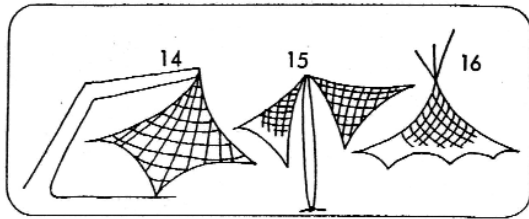
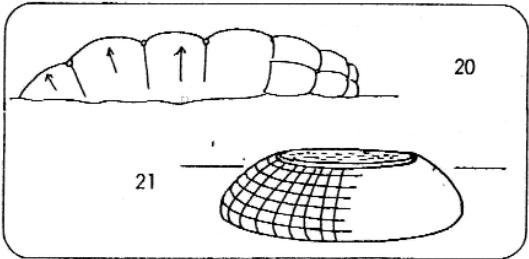
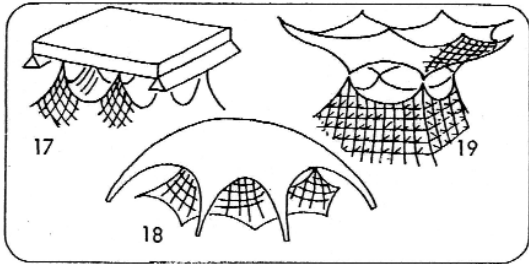


Fig. 139. Tipos de bordes de red. Fuente: IL 8 pág. 24
 Fig. 140. Combinaciones de dos tipos de bordes de red. Fuente: Tensile structures 2, pág. 64
 Fig. 141. Bordes de redes espaciales. Fuente: IL 8 pág. 24
 Fig. 142. Posibilidades y variaciones del elemento estructural "borde de red". Fuente: IL 8 pág. 37

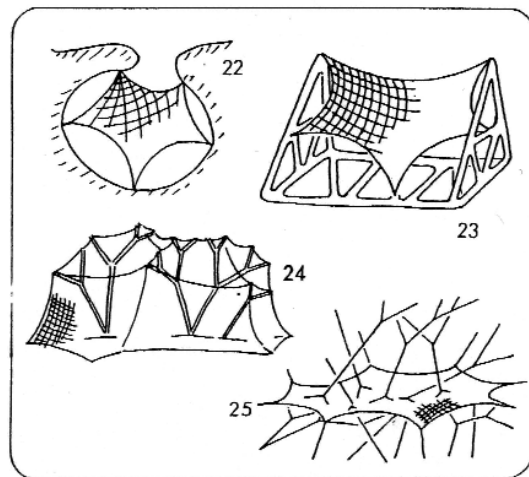




143



144



145

VI.1.8. Elemento estructural "soporte de red".

Independientemente de que la red soportada sea uni-, bi- o tridimensional, el soporte puede estar formado por elementos unidimensionales, tales como vigas o pescantes trabajando a flexión (fig. 143.14), mástiles comprimidos (fig. 143.15) o cables traccionados (fig. 143.16).

La función de soporte también puede estar desempeñada por estructuras bidimensionales, tales como losas o placas macizas resistentes a flexión, o placas de celosía (fig. 144.17), o bien cáscaras o bóvedas de celosía de malla comprimidas (fig. 144.18), o bien redes de cables (fig. 144.19). También hace las veces de soporte bidimensional la sobrepresión interna generada por aire en cubiertas neumáticas (fig. 144.20), o por agua en depósitos o contenedores (fig. 144.21).

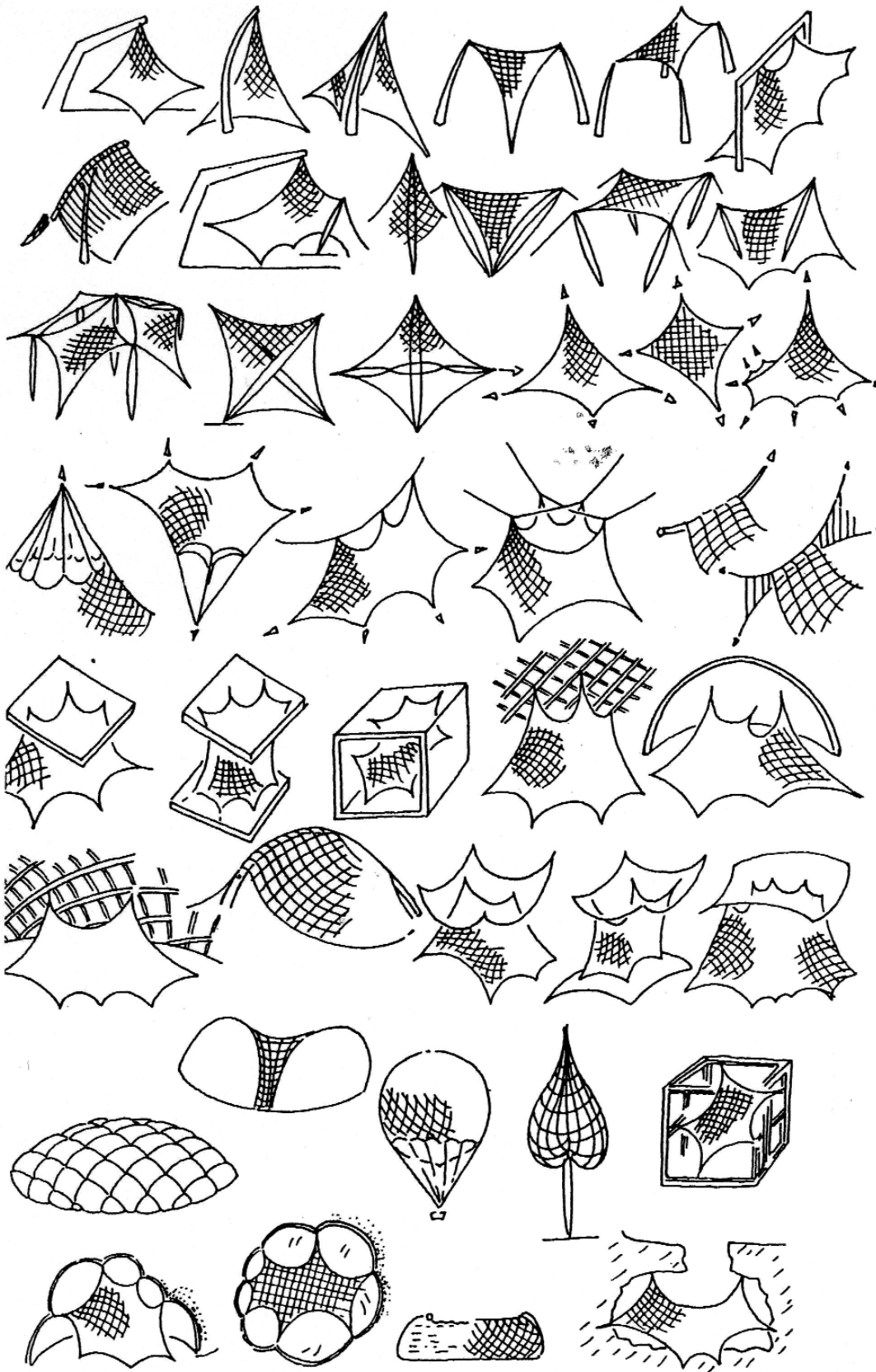
Los soportes tridimensionales pueden ser macizos (fig. 145.22), solicitados principalmente a flexión (fig. 145.23), compresión (fig. 145.24) o tracción (fig. 145.25).

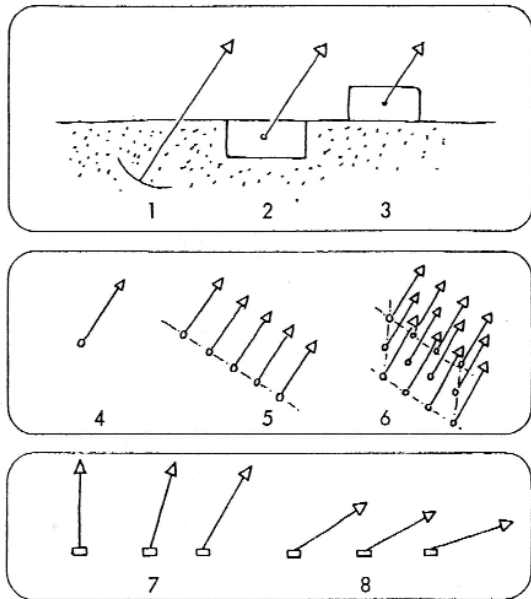
Fig. 143. Soportes de red unidimensionales. Fuente: IL 8 pág. 25

Fig. 144. Soportes de red bidimensionales. Fuente: IL 8 pág. 25

Fig. 145. Soportes de red tridimensionales. Fuente: IL 8 pág. 25

Fig. 146. Posibilidades y variaciones del elemento estructural "soporte de red". Fuente: IL 8 pág. 38





147

VI.1.9. Elemento estructural "anclaje".

Se pueden diferenciar anclajes ligeros (fig. 147.1) y anclajes de gravedad (fig. 147.2, 3). Por otro lado las fuerzas de tracción pueden ser conducidas al terreno de la construcción de forma puntual (fig. 147.4), lineal (fig. 147.5) o superficial (fig. 147.6). Según la dirección de la fuerza de tracción se puede distinguir entre anclajes con ángulos empinados (fig. 147.7) y anclajes con ángulos muy agudos (fig. 147.8).

La forma de los anclajes depende también del medio: aire (fig. 148.9), agua (fig. 148.10), tierra (fig. 148.11) y roca (fig. 148.12). Los anclajes pueden ser también fijos, como los perforados en roca (fig. 148.12) o móviles, como las clavijas de las tiendas (fig. 148.13).

148

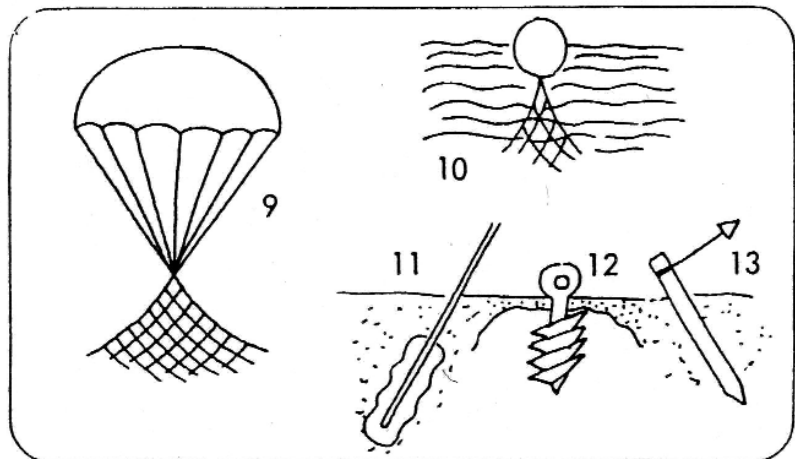


Fig. 147. Tipos de anclajes. Fuente: IL 8 pág. 26

Fig. 148. Anclajes en diferentes medios. Fuente: IL 8 pág. 26

Fig. 149. Posibilidades y variaciones del elemento estructural "anclaje". Fuente: IL 8 pág. 38

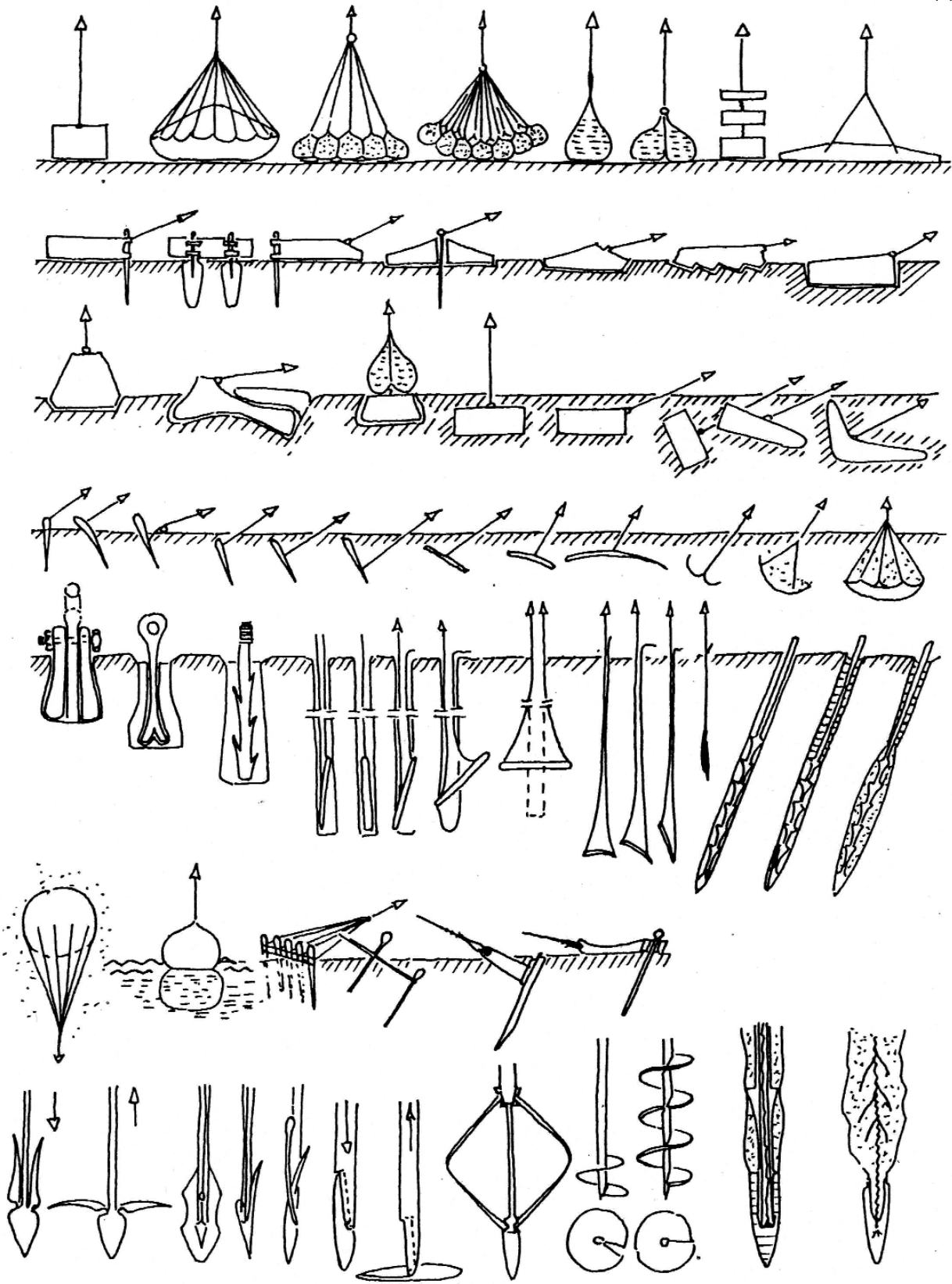
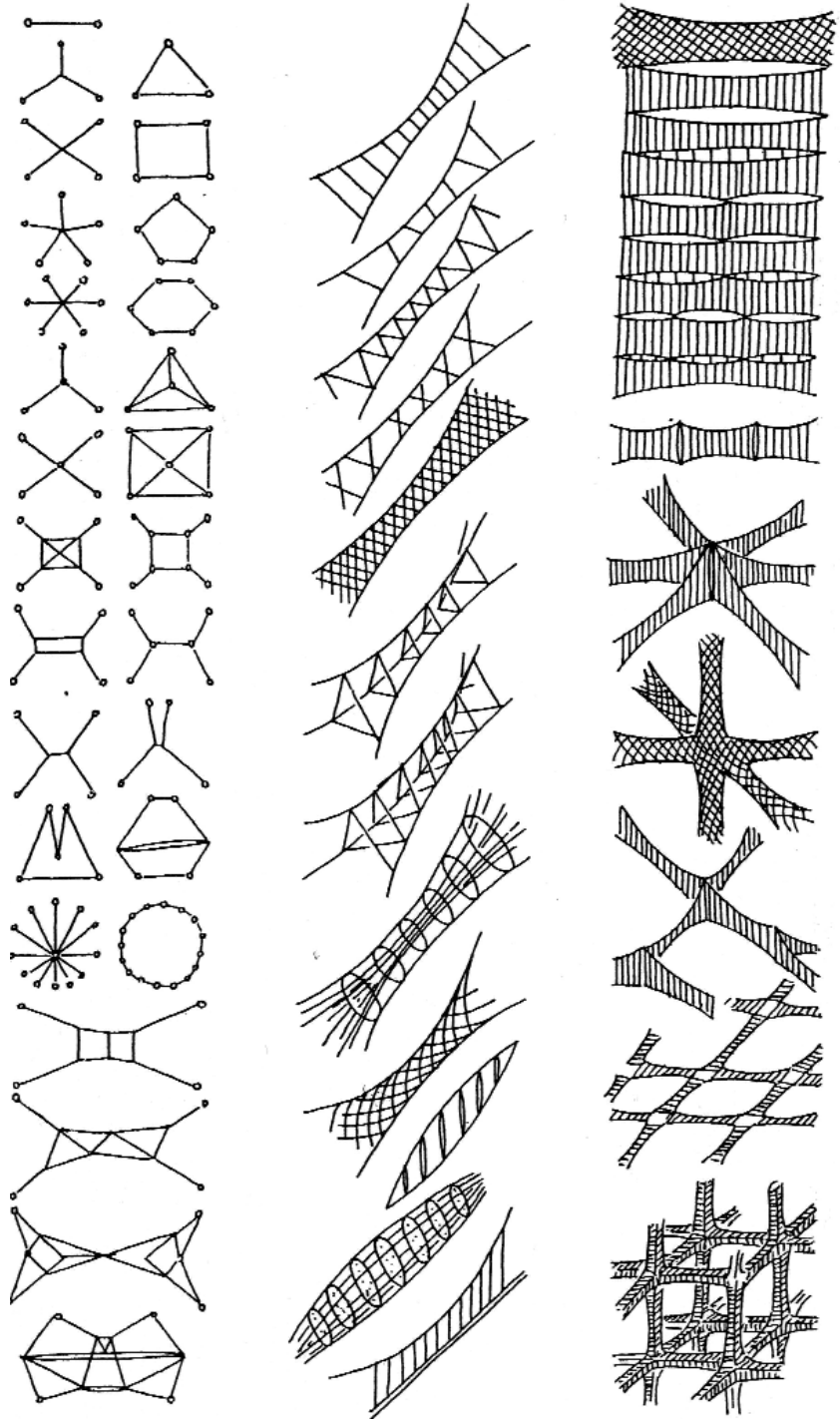


Fig. 150. Secciones transversales de redes unidimensionales. Adiciones y combinaciones de redes unidimensionales. Fuente: IL 8 pág. 36

VI.1.10. Formas de redes.

1. Unidimensionales.



2. Bidimensionales.

Fig. 151. Formas de redes bidimensionales. Redes espacialmente curvadas o de doble curvatura. Fuente: IL 8 pág. 36

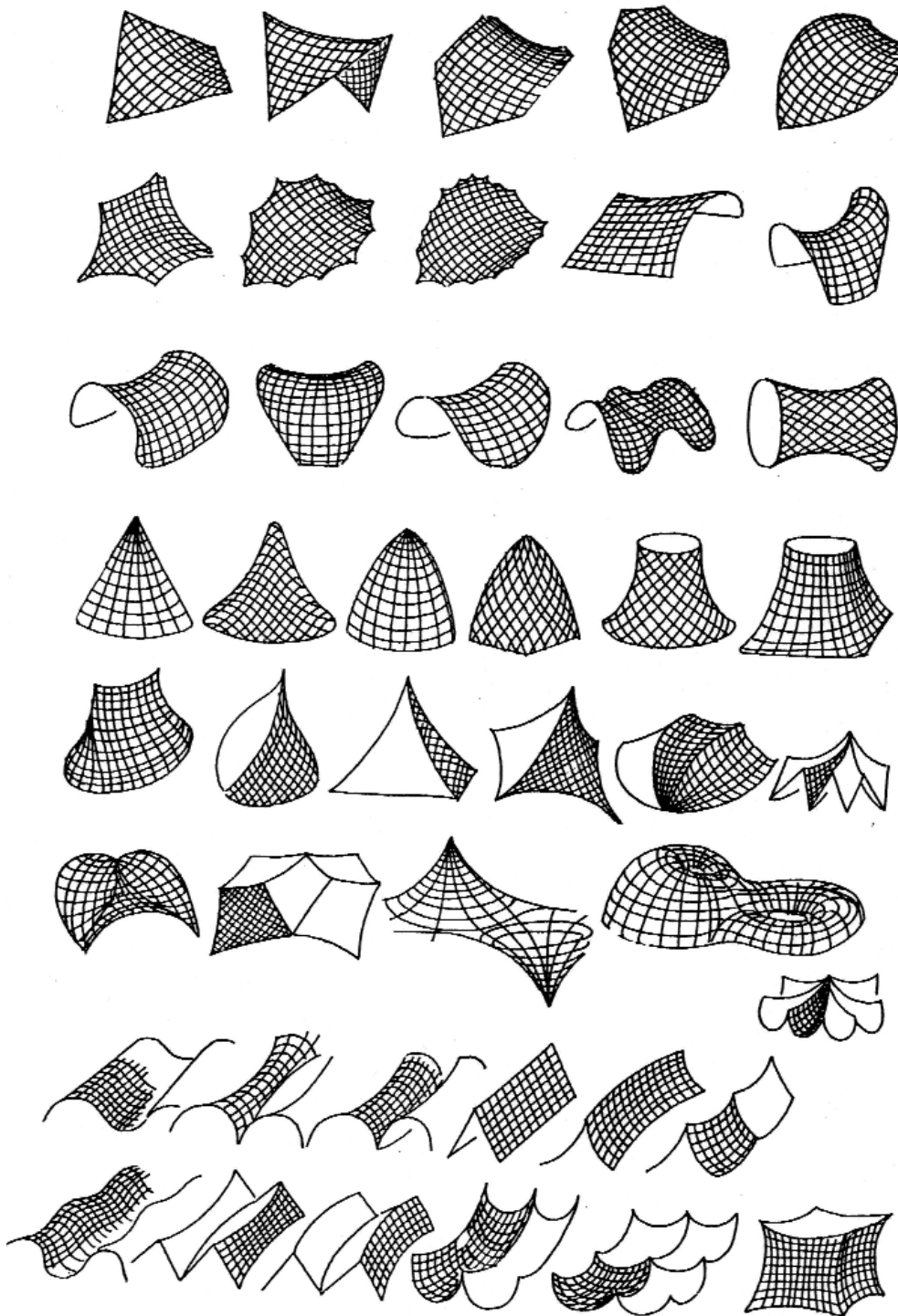
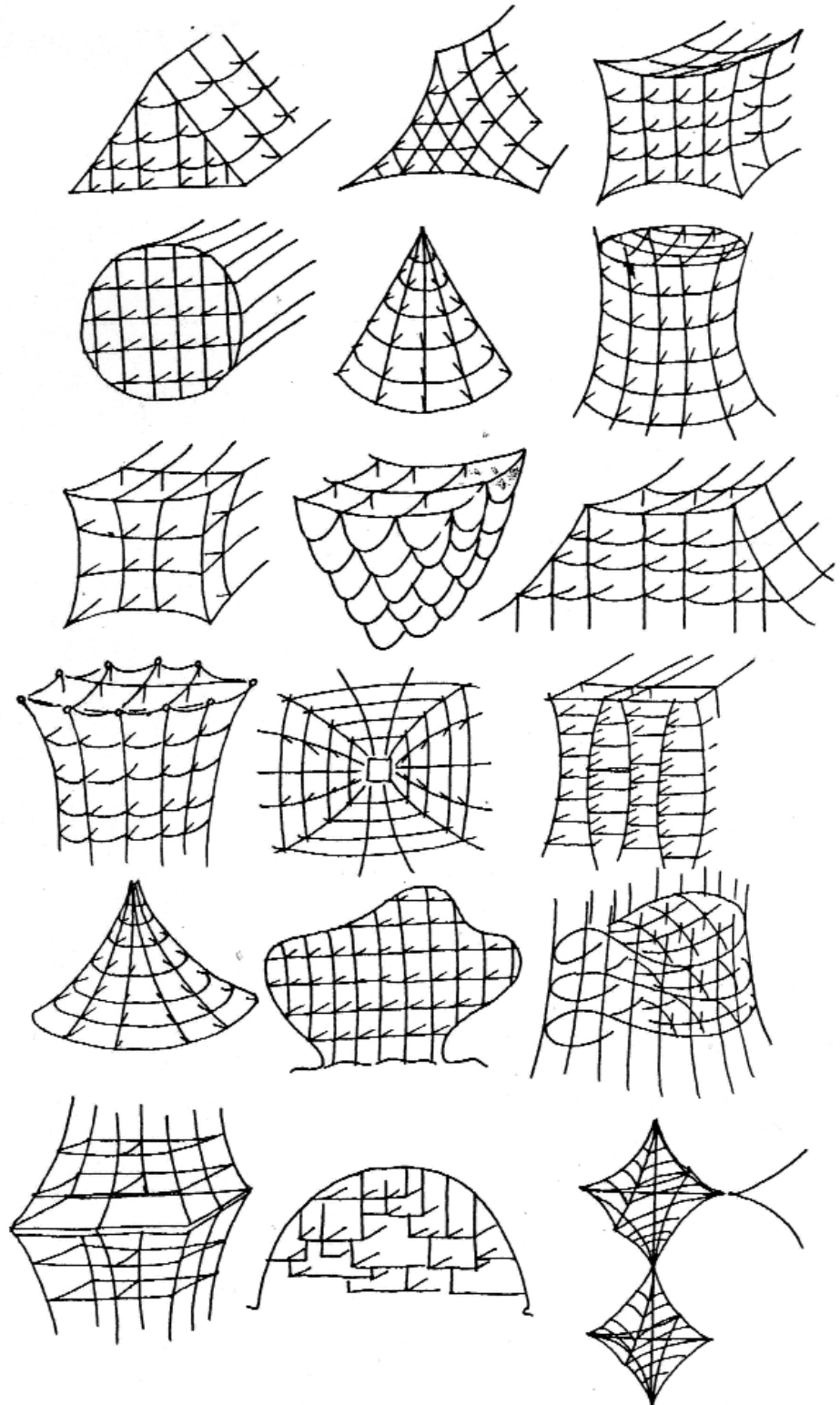


Fig. 152. Formas de redes tridimensionales. Fuente: IL 8 pág. 37

3. Tridimensionales.



VI.1.11. Variaciones, adiciones y combinaciones de redes con formas alabeadas.

Fig. 153. Variaciones, adiciones y combinaciones de redes con formas alabeadas. Fuente: ROLAND, C.: *Frei Otto: Estructuras*, pág. 16

La forma alabeada más sencilla es aquella cuyo perímetro es un cuadrado de lados no coplana-rios. Esta forma es de gran importancia como módulo elemental para la realización de formas de mayor complejidad, como las que se muestran en la mitad inferior del cuadro de variaciones adjunto. También aparecen combinaciones de diferentes tipos de bor-des, apoyos y mallas.

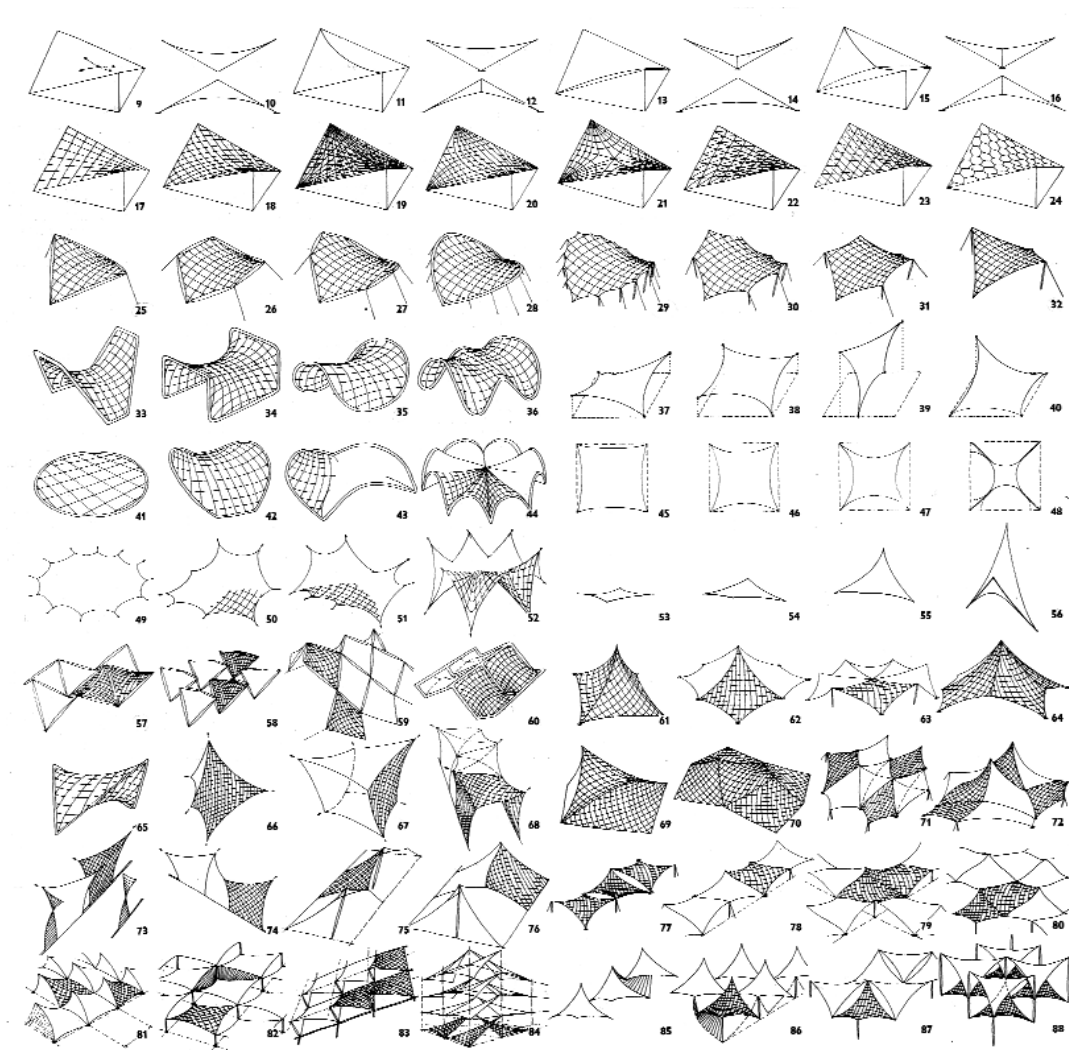


Fig. 154. Variaciones, adiciones y combinaciones de redes formando superficies onduladas. Fuente: ROLAND, C.: *Frei Otto: Estructuras*, pág. 26

VI.1.12. Variaciones, adiciones y combinaciones de redes formando superficies onduladas.

Las redes de cables onduladas se diferencian de las formas alabeadas simples porque la curvatura y el pretensado de las mismas se consigue traccionando los cables en dos sentidos contrarios aunque en dirección paralela, mientras que en las de formas alabeadas las dos direcciones principales son perpendiculares u oblicuas. También es posible formar superficies onduladas en estrella, cuando los elementos modulares se disponen radialmente.



VI.1.13. Variaciones, adiciones y combinaciones de redes soportadas por arcos.

Fig. 155. Variaciones, adiciones y combinaciones de redes soportadas por arcos. Fuente: ROLAND, C.: *Frei Otto: Estructuras*, pág. 52

155

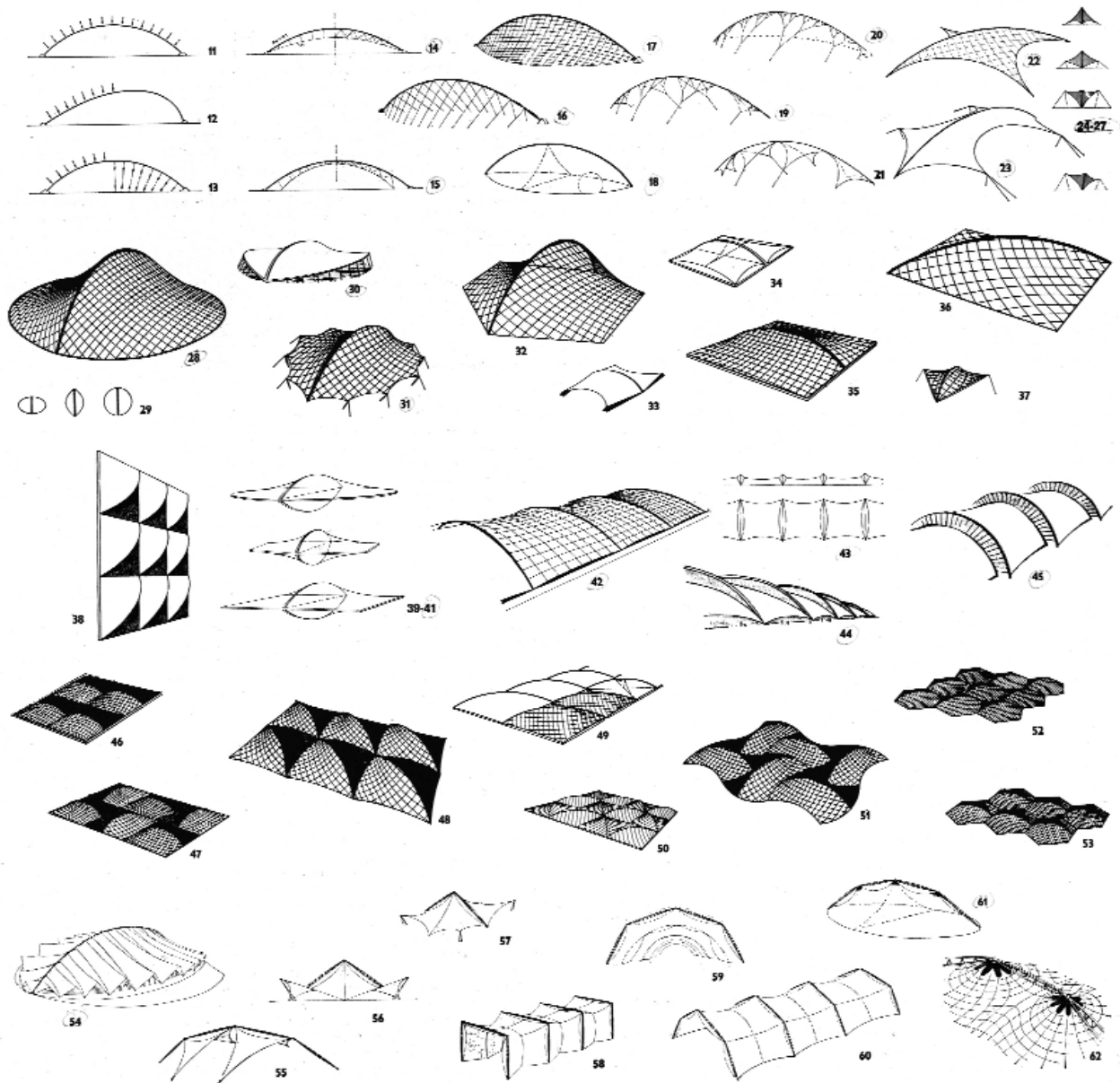
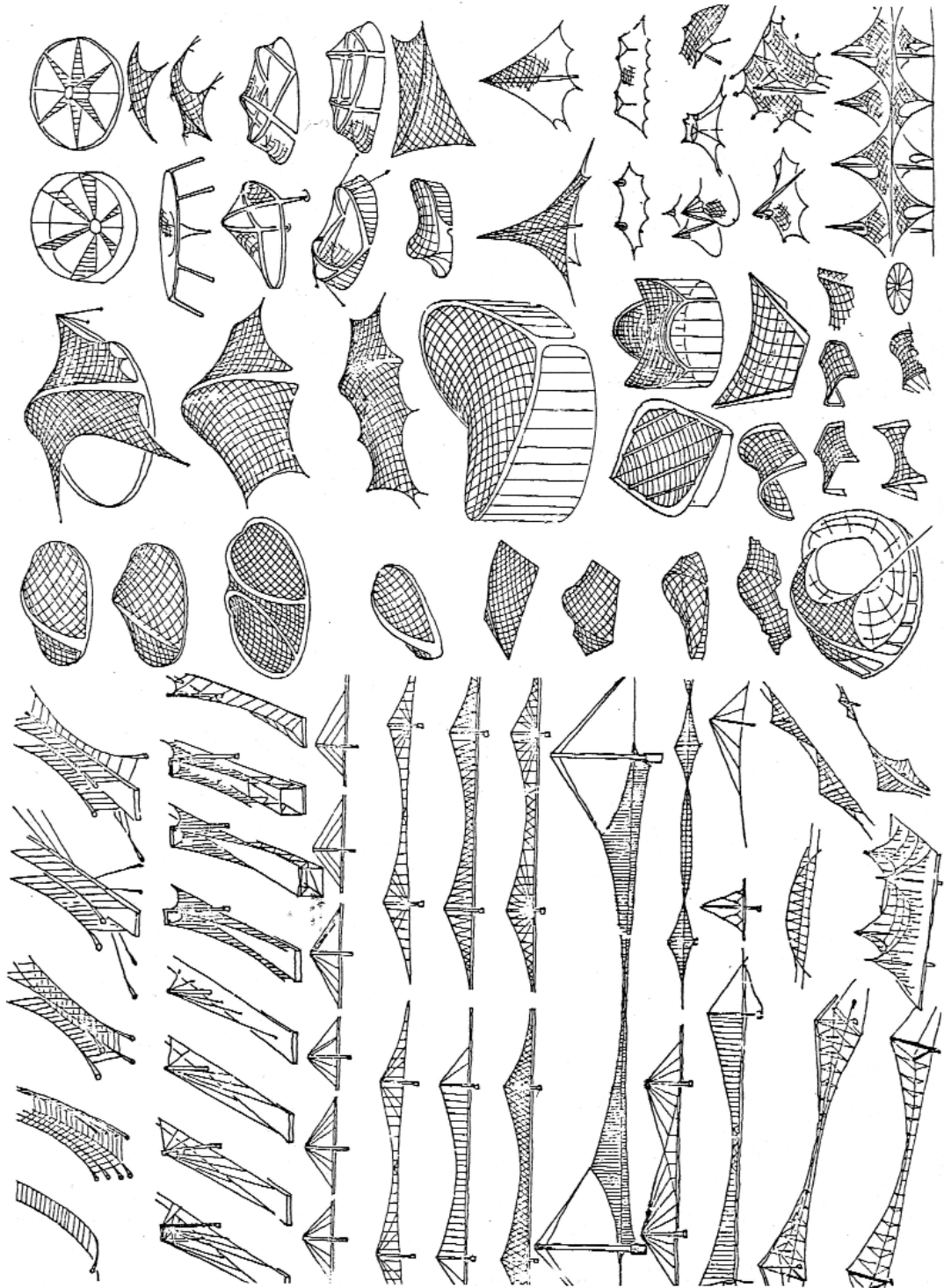
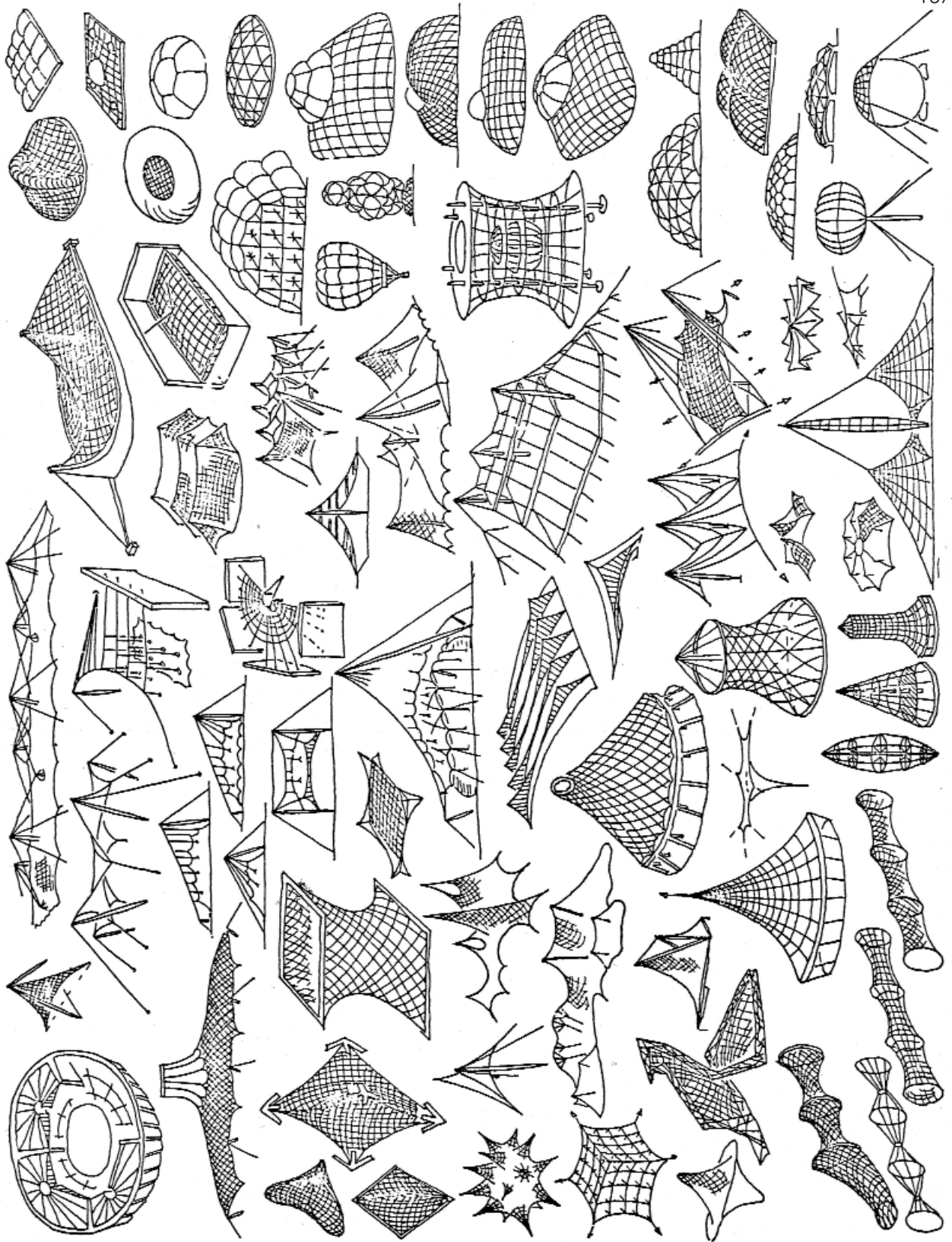


Fig. 156. Croquis de sistemas completos de estructuras de redes. Fuente: IL 8 pág. 44

Fig. 157. Croquis de sistemas completos de estructuras de redes. Fuente: IL 8 pág. 45

VI.1.14. Croquis de proyectos de sistemas completos de estructuras de redes.





VI.2. Las cáscaras o bóvedas de celosía de capa única.

Este es uno de los tipos estructurales que ha iniciado, planteado y resuelto Frei Otto desde su Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart. Habría que ubicarlo dentro del proceso de búsqueda de la forma resistente por él seguido, en el que la ligereza, las estructuras mínimas y la tendencia a cubrir mayores espacios con menos material han sido objetivo permanente. Si las estructuras de redes, como estructuras traccionadas, eran, después de las cáscaras delgadas de hormigón armado, la etapa siguiente en esa tendencia hacia la ligereza, la necesidad de explorar las posibilidades de máxima ligereza en las cubiertas comprimidas encontraba la contrapartida a las estructuras de redes en las bóvedas de celosía de capa única.

Para entender los fundamentos de esta tipología estructural, en cuyo planteamiento y desarrollo Frei Otto y su instituto tuvieron un papel primordial, conviene observar la terminología por él adoptada para designar este nuevo tipo de estructuras. "*Gitterschalen*" es la expresión utilizada para ello en el idioma de origen, el alemán. Literalmente se traduciría como "cáscaras de celosía". Se trata por tanto de unas estructuras laminares, delgadas o superficiales, generalmente siguiendo geometrías de doble curvatura, constituidas por un entramado o celosía de barras, formada por mallas de cuadriláteros de lados iguales, de tal manera que la distancia entre los nudos permanece constante. Un ejemplo a pequeña escala que recogería los principios de este tipo de estructuras sería el colador de cocina formado por una malla cuadrilátera de alambre.

Estas estructuras se diferencian de otras bóvedas también formadas por entramados o celosías de barras, como las cúpulas geodésicas, además de por algunas características ya mencionadas, como las mallas de cuadriláteros, que en las cúpulas geodésicas son mallas triangulares, fundamentalmente porque, por un lado, no forman un entramado espacial de doble capa, sino de capa única, y por otro lado porque no se atienen a geometrías primarias o elementales como la esfera, que es la forma más característica de las cúpulas geodésicas.

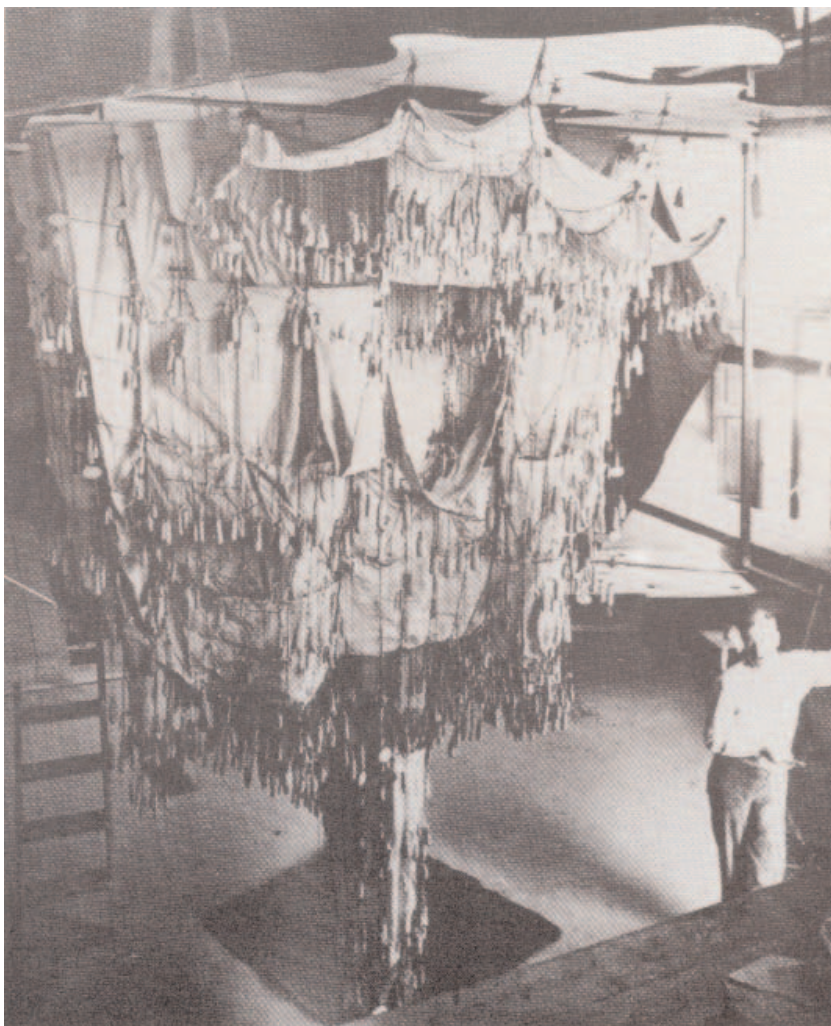
Si se pretende que la bóveda de celosía de capa única trabaje principalmente a compresión será necesario buscar formas antifuniculares, de lo contrario habría que proporcionar rigidez a flexión a los elementos de su capa simple para absorber los momentos debidos a una forma y sollicitación no funicular. Por ello la forma de las bóvedas de celosía de capa única viene determinada por la forma invertida de una red flexible colgada. Se trata del mismo principio mediante el cual la forma invertida de una catenaria produce la línea de empujes de un arco no sometido a flexión. Un principio que se hace patente en la obra de Antonio Gaudí, cuyos ensayos con maquetas de hilos colgantes eran el punto de partida de diseños como la capilla de la colonia Güell, las naves del templo de la Sagrada Familia o los muros de contención y puentes del Park Güell. Al invertir la maqueta de hilos, los polígonos formados por éstos señalaban la dirección de los soportes.

Un claro exponente del interés que ha suscitado en Frei Otto y su instituto esta metodología de Gaudí para la búsqueda de la forma resistente ha sido el proyecto de reconstrucción de la maqueta

para la capilla de la colonia Güell, realizado en el Instituto de Estructuras Ligeras dentro del marco del programa de investigación SFB 230 "Estructuras naturales" en el área C3 "Historia de la construcción". Este proyecto y los conocimientos generados por la investigación que condujo a la reconstrucción de esta maqueta fueron objeto de una tesis doctoral publicada por el Instituto dentro de la serie *IL Mitteilungen* (Informes IL)¹³⁸.

Fig. 158. Maqueta original para la iglesia de la colonia Güell de Antonio Gaudí. Fuente: IL 34 pág. 118

158

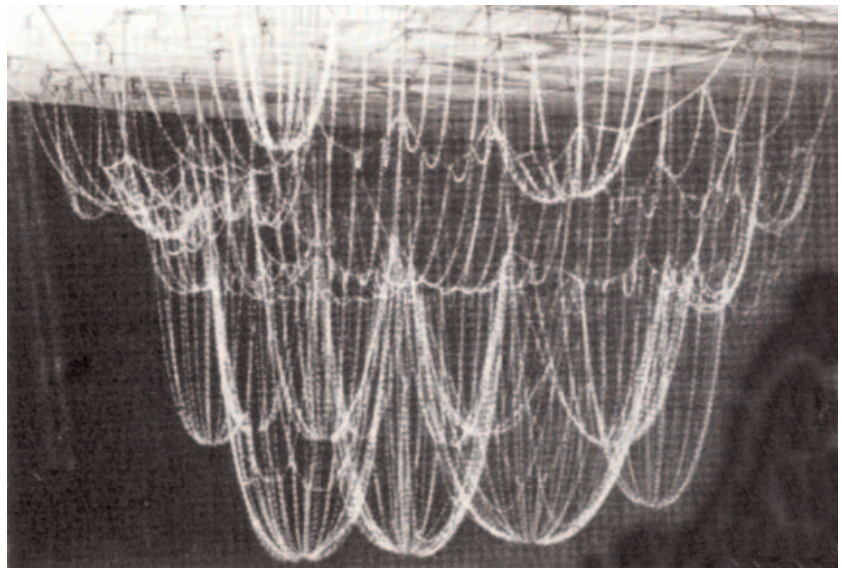


¹³⁸ TOMLOW, Jos: *Das Modell: Antoni Gaudis Hängemodell und seine Rekonstruktion; neue Erkenntnisse zum Entwurf für die Kirche der Colonia Güell*. Krämer. Stuttgart, 1989. (IL 34).

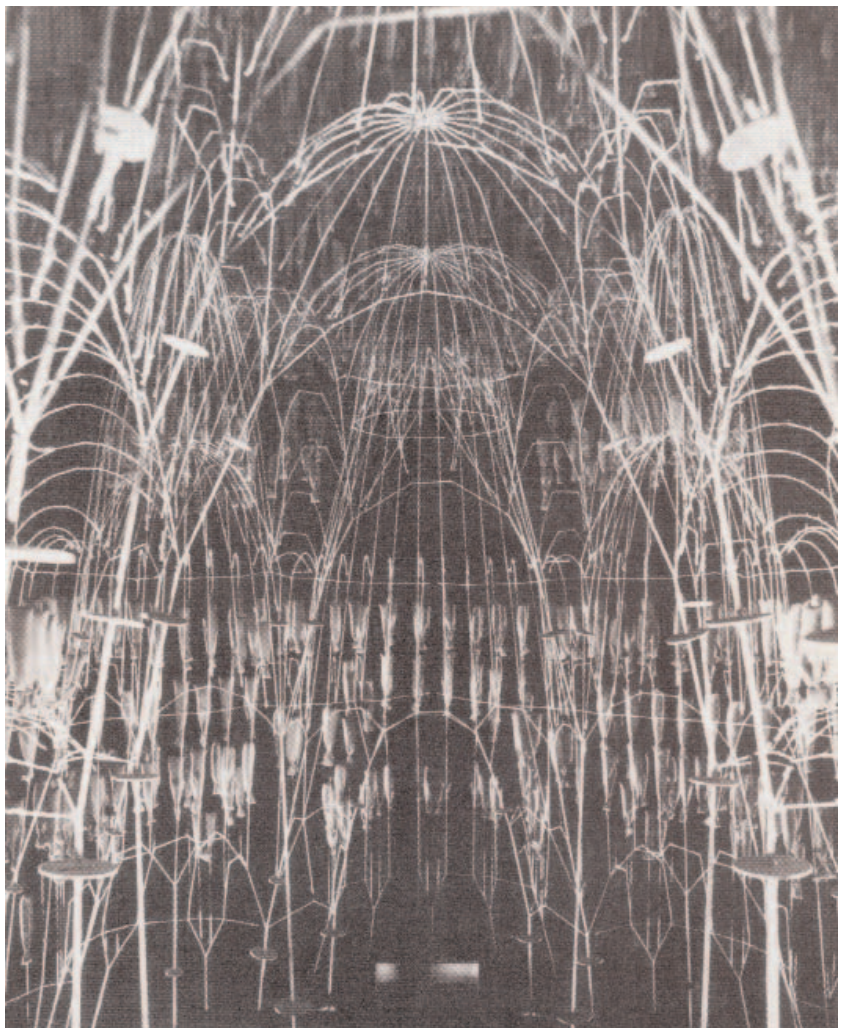
Fig. 159. Maqueta de cadenas simplificada del mismo edificio. Grupo Gaudí, Delft. Fuente: IL 34 pág. 36

Fig. 160. Maqueta reconstruida del mismo edificio. Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart. Vista hacia el altar. Fuente: IL 34 pág. 115.

Fig. 161. Arco con dovelas articuladas. Fuente: IL 10 pág. 123

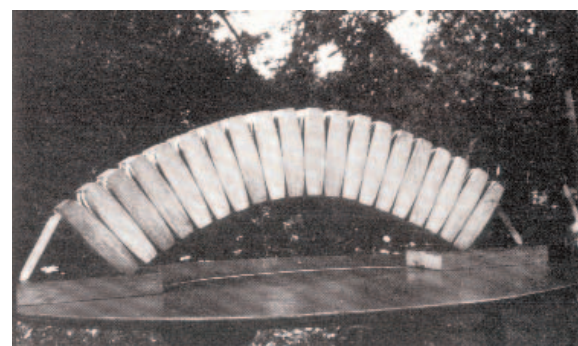
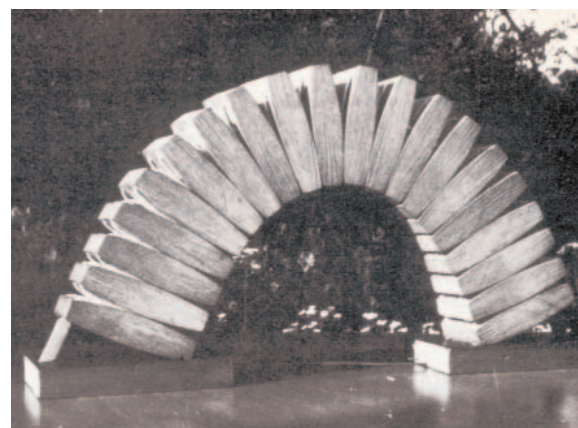


159 y 160



VI.2.1. Antecedentes experimentales desarrollados por Frei Otto y sus colaboradores.

Entre 1946 y 1949 Frei Otto llevó a cabo ensayos con maquetas colgantes de tela con el objetivo de encontrar formas de cubiertas que se pudieran construir de manera sencilla y económica a partir de ladrillos de escombros¹³⁹. Entre 1950 y 1951 desarrolló la maqueta de un arco *multiarticulado*, es decir, con dovelas articuladas, para hacer visible la línea de presiones de un arco trabajando sólo a compresión (fig. 161). En 1958 con ocasión de un seminario para graduados en la *School of Architecture* de la *Washington University* en St. Louis, dirigido por Frei Otto, se realizaron maquetas colgantes de membranas de goma cargadas con clavos uniformemente repartidos. Las maquetas estaban suspendidas de cuatro o seis esquinas conectadas con arcos perimetrales de cables curvados. La forma de la membrana se fijó sumergiéndola en una disolución de yeso, y se rigidizó con resina de poliéster reforzada con fibra de vidrio (fig. 162 y 163).



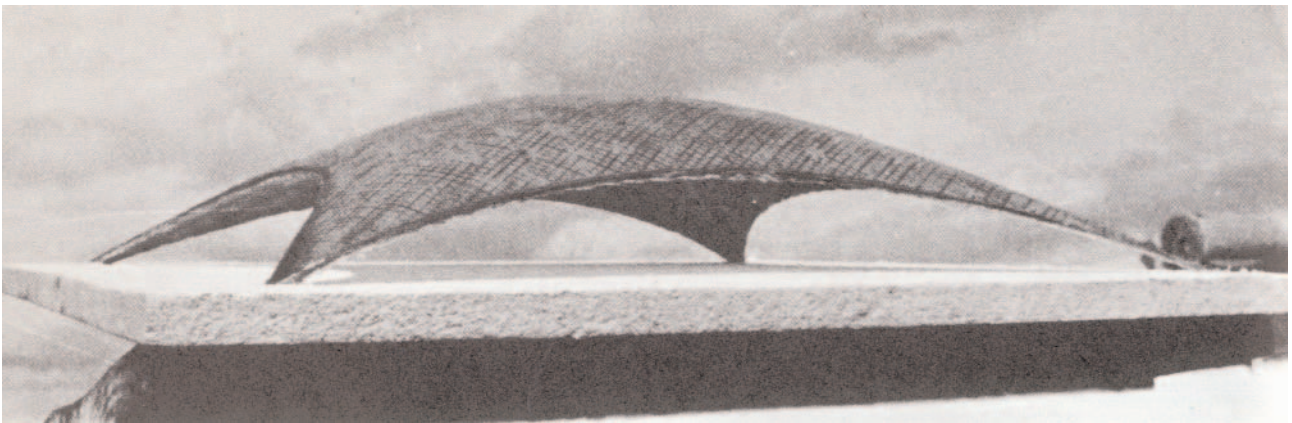
161

¹³⁹ Véase GRAEFE, Reiner: "Druckbeanspruchte Tragwerke – Beispiele aus der Baugeschichte", en A.A.V.V.: *Gitterschalen / Grid shells*. Institut für leichte Flächentragwerke. Stuttgart, 1974. Pág. 22.

Fig. 162. Maqueta de membrana de goma, rigidizada e invertida, de cuatro esquinas. Fuente: Tensile Structures I. Pág. 158

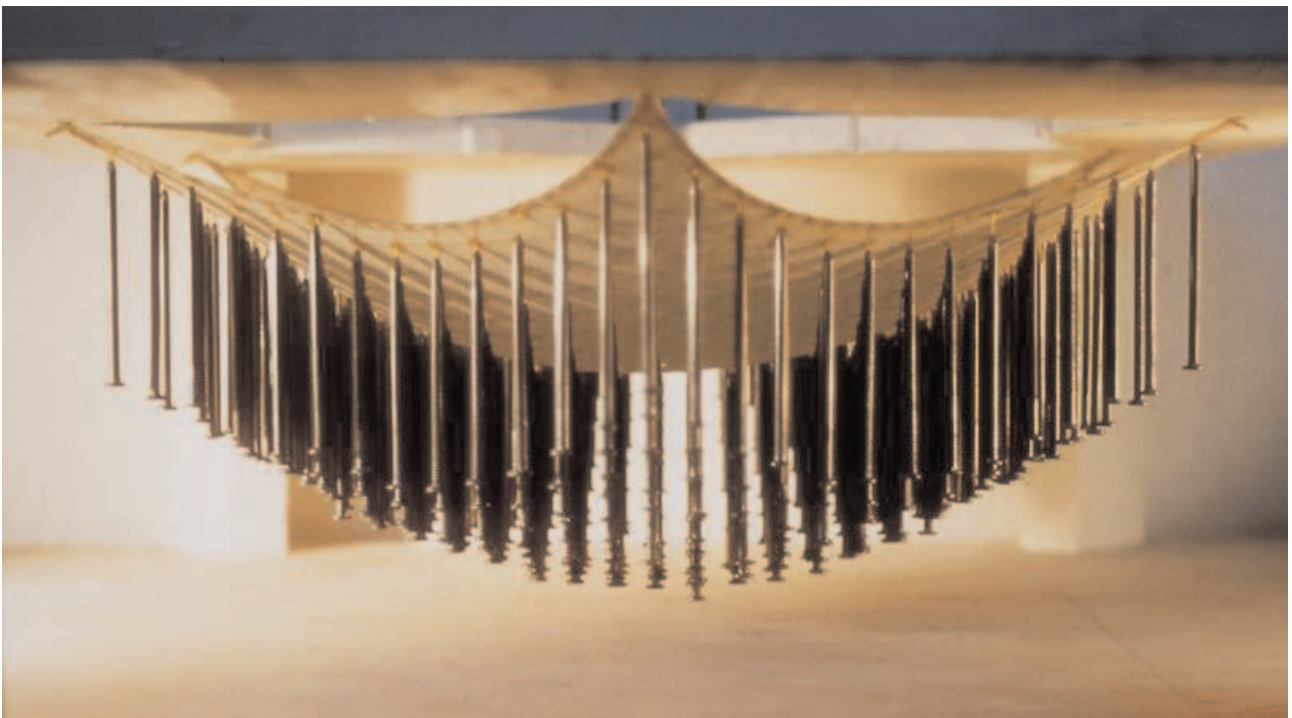
Fig. 163. Maqueta colgada de membrana de goma de seis esquinas. Fuente: Archivo IL, diapositiva 1.11.6

Fig. 164. Maqueta de bóveda de listones de madera de malla cuadrangular. Fuente: Tensile Structures I, pág. 160 y 161



162

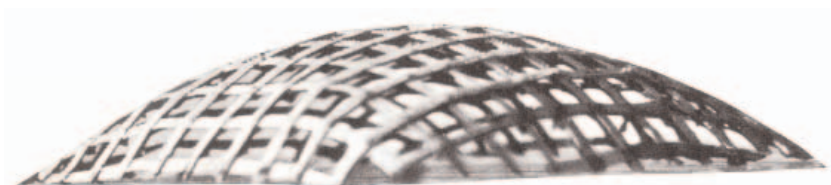
163



El arquitecto de St. Louis, John Koch, graduado en la Washington University, investigó entre 1960 y 1961 otros tipos¹⁴⁰ de bóvedas de celosía en el *Entwicklungstätte für den Leichtbau* (Centro para el desarrollo de la construcción ligera) de Berlín, fundado por Frei Otto en 1957. Uno de los ensayos realizados en esta investigación consistió en una cúpula de listones de madera formando un entramado de malla cuadrangular uniforme. Para este ensayo se partió de una retícula originariamente cuadrada, que se deformó desplazando las esquinas para formar la cúpula. La forma quedó determinada por medio de una serie de cargas puntuales uniformemente repartidas aplicadas sobre la maqueta suspendida. Finalmente ésta se rigidizó vertiendo resina de poliéster alrededor de la madera (fig. 164).

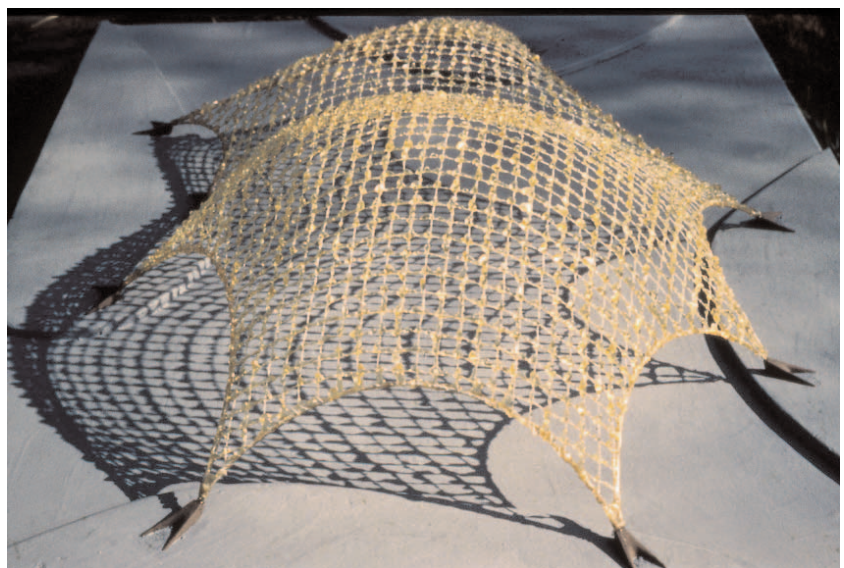
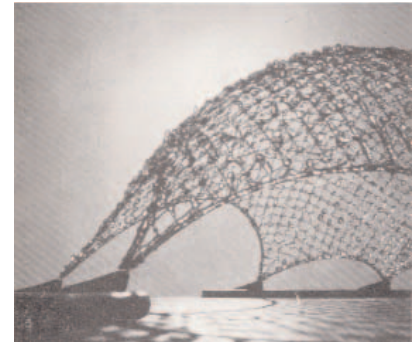
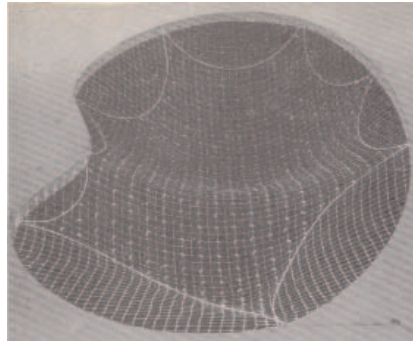
Otro de los ensayos realizados por John Koch en el *Entwicklungstätte für den Leichtbau* de Berlín consistió en una red de cables suspendida de unos bordes perimetrales formados por arcos de cables traccionados, que a su vez pendían de ocho puntos. Para explorar nuevas posibilidades formales, tanto la distribución de los puntos de suspensión como la geometría de la maqueta en su conjunto se dispuso con formas claramente asimétricas. La red se sometió a una distribución uniforme de cargas, y se rigidizó con resina de poliéster, para ser posteriormente invertida (fig. 165).

164



¹⁴⁰ Véase OTTO, Frei (ed.): *Tensile Structures*. Vol. I. M.I.T. Press. Mass., 1967 (1962). Pág. 160-161.

Fig. 165. Ensayo con una red de cables suspendida de ocho puntos rigidizada e invertida. Fuentes: ROLAND, C. op. cit. pág. 122; IL 25 pág. 6.5; Archivo IL, Diapositivas 1.17.42 y 1.17.45



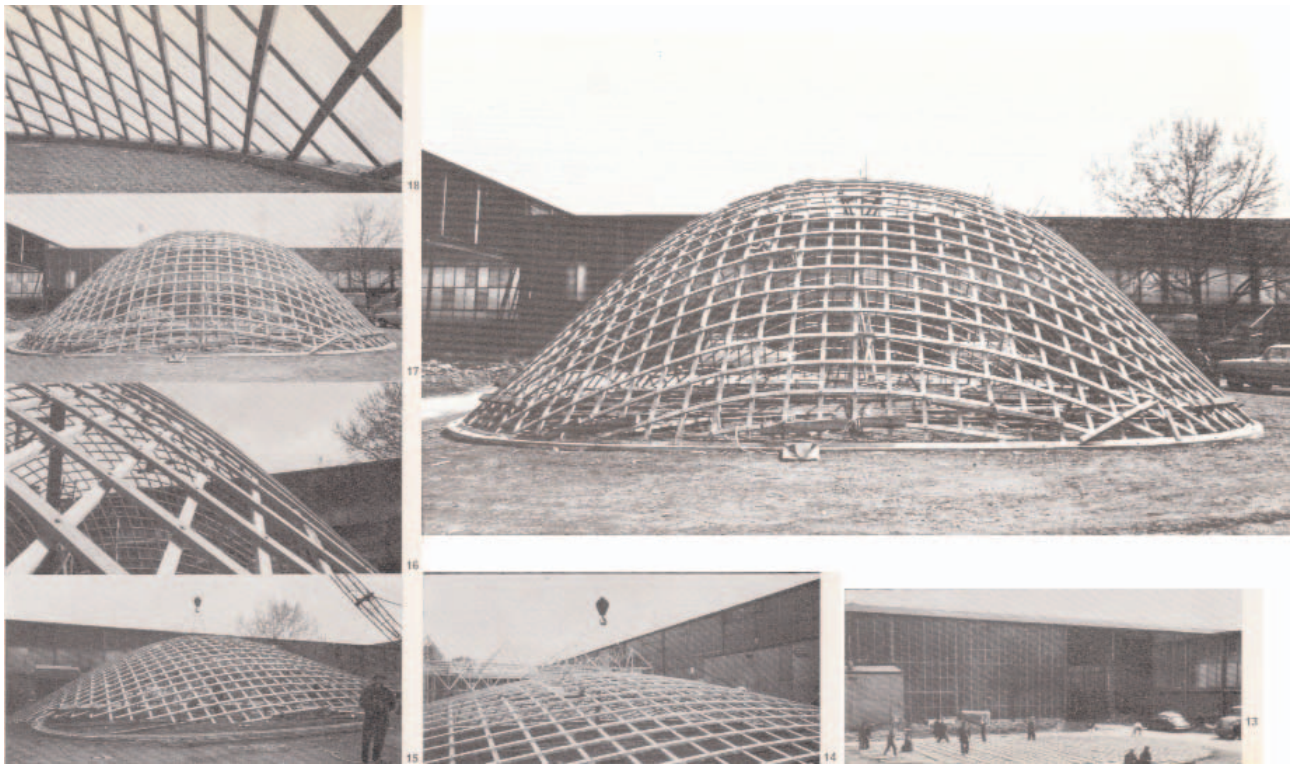
165

En 1962 se realizaron dos construcciones experimentales de bóvedas de celosía, dirigidas por Frei Otto. La primera de ellas en el contexto de la feria alemana de la construcción (*Deutsche Bauausstellung*, abreviadamente *Deubau*) en Essen. La bóveda cubría una superficie cuadrada de esquinas redondeadas de 15 metros de luz, con una celosía de malla cuadrangular de 0'48 metros de lado, formada por listones de madera, alcanzando la bóveda una altura máxima de 5 metros¹⁴¹.

Esta construcción se generó a partir de una celosía ortogonal plana de malla cuadrada dejada sobre el suelo, elevando la zona central de la misma, y aproximando el perímetro de la celosía a un anillo de compresión anclado al suelo, de tal manera que se iba produciendo una deformación tridimensional por la variación del ángulo de cruce de los listones de la celosía. Una vez alcanzada la forma de la bóveda, ésta quedaba fijada roscando fuertemente los pernos de los nudos de la celosía, y fijando los extremos de los listones al anillo perimetral de anclaje. Una gran parte de las mallas cuadradas de la celosía plana se convertían en mallas rómbicas en la bóveda final, siendo más alargados los rombos cuanto más próximos a los ejes diagonales de la bóveda (fig. 166 y 167).

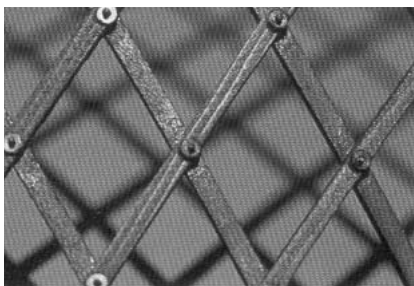
En este tipo de bóvedas es importante observar que en la medida en que la forma final de la celosía plana deformada se aproxime a una maqueta funicular, los esfuerzos de flexión que la bóveda deba resistir serán mínimos, si se considera como acción fundamental el peso propio.

¹⁴¹ Véase ROLAND, C.: *Frei Otto: Estructuras*. Gustavo Gili. Barcelona, 1973 (1965). Pág. 124.

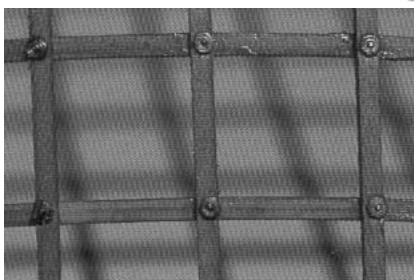


166

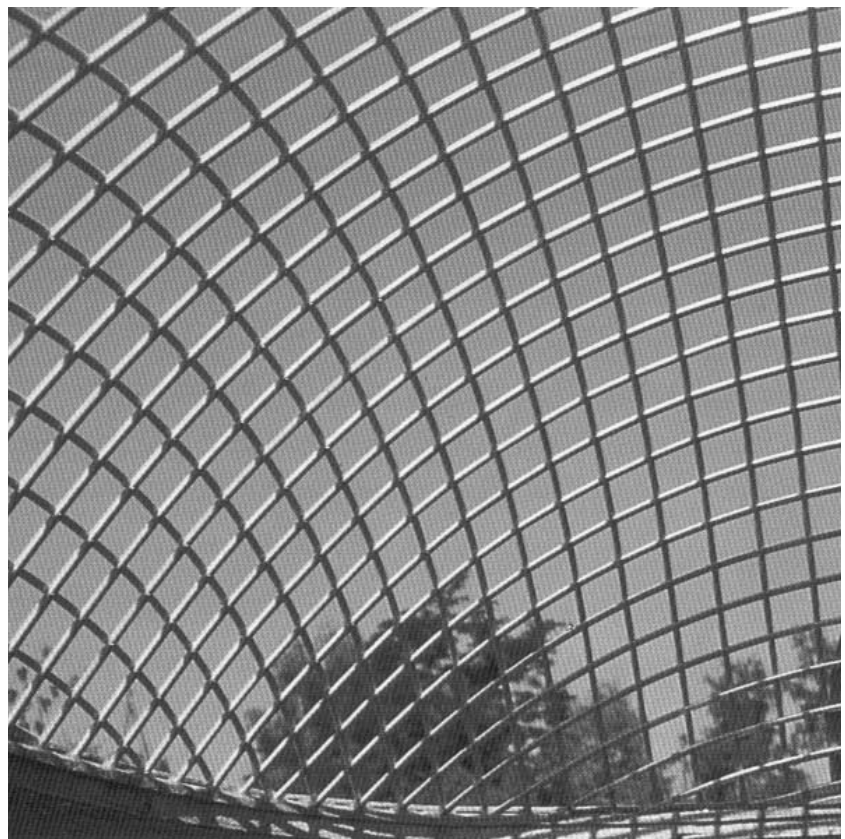
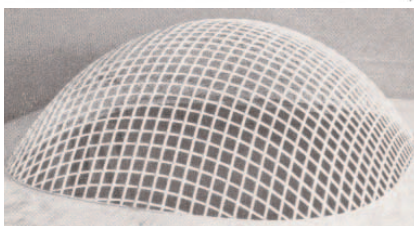
167



5



4



La segunda bóveda de celosía experimental construida en 1962 (fig. 168) se realizó con ocasión de un seminario sobre estructuras ligeras dirigido por Frei Otto en la Universidad de California (Berkeley). Se trata también de una celosía de mallas cuadrangulares construida a partir de una retícula plana que se eleva hasta hacer coincidir su forma con la de una maqueta funicular suspendida, pero esta vez las mallas de la celosía no eran iguales ni ortogonales, y estaba formada por barras de redondos de acero corrugado de 12 mm. de diámetro que ya no apoyaban en la totalidad del perímetro, sino tan solo en cuatro arcos perimetrales de borde, que a su vez concurrían en cuatro puntos de apoyo. La distancia entre puntos de apoyo en la dirección de los ejes principales era de 7'8 metros, y en dirección diagonal 11'1 metros. La altura máxima era de 3'2 metros. La fijación de la forma y la rigidización de la bóveda se basaba únicamente en la rigidización de los nudos por rozamiento.

168

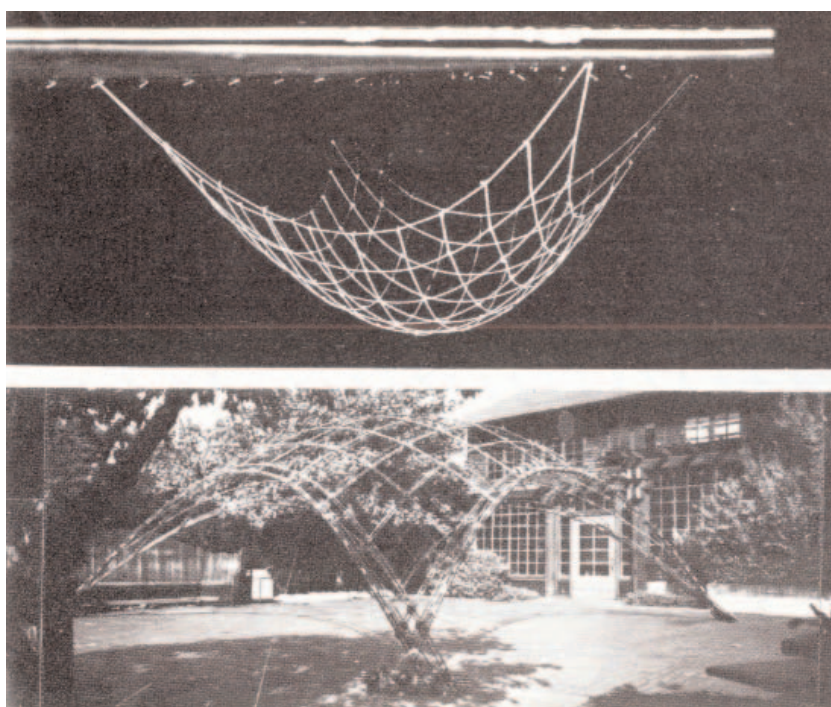


Fig. 166. Bóveda de celosía en Essen. Proceso de construcción. Fuente: ROLAND, C. op. cit. pág. 125; IL 10 pág. 273

Fig. 167. Maqueta de la bóveda de celosía de Essen. Fuente: ROLAND, C. op. cit. pág. 124 y SCHANZ, S. (ed.): *Frei Otto, Bodo Rasch: Finding Form*. Axel Menges, 1995. pág. 138

Fig. 168. Bóveda de celosía en Berkeley. Fuente: IL 10 pág. 271 fig. 3 y 4; ROLAND, C.: op. cit. pág. 127



VI.2.2. El pabellón para la *Bundesgartenschau* de 1975 en Mannheim¹⁴².

En 1966 Frei Otto, en colaboración con Rolf Gutbrod, diseñó otra importante bóveda de celosía que se construyó para la sala de conferencias o auditorio para unas 230 personas, del pabellón alemán de la Exposición Universal de 1967 en Montreal, pero la obra que demostró las posibilidades de este tipo de estructuras fue el pabellón para la *Bundesgartenschau* (exposición federal de jardinería) de 1975 en Mannheim para el que Frei Otto y sus colaboradores actuaron como consultores de los arquitectos Mutschler, Langner y asociados, contando con la asistencia técnica del ingeniero Edmund Happold¹⁴³, de la oficina de Ove Arup y asociados.

Este pabellón consiste en dos grandes salas (sala multiuso y restaurante) conectadas por un paseo (fig. 169), dispuesto todo ello en una planta de curvas irregulares, con una cubierta única de celosía formada por listones continuos de madera, en la que se acoplan diferentes superficies curvas libres, de una malla cuadrada antifunicular. Entre las superficies hay varias zonas anticlásticas y un valle (fig. 175). La forma esencial antifunicular de la cubierta se obtuvo mediante una maqueta formada por una red catenaria suspendida de un borde libre (fig. 170). La construcción y el montaje se realizaron partiendo de la celosía ortogonal

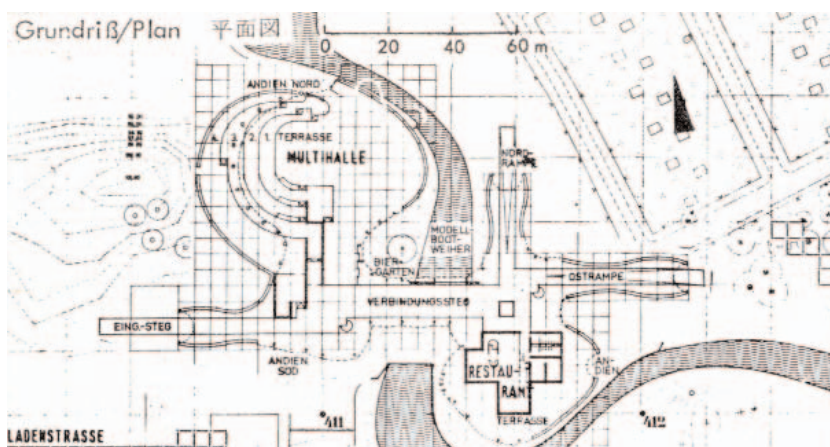
¹⁴² Para una información detallada sobre esta obra véase la publicación del Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart, dentro de la serie *Mitteilungen*, A.A.V.V.: IL 13 *Multihalle Mannheim / Multihall Mannheim*. Krämer. Stuttgart, 1978.

¹⁴³ Sobre la consideración de Frei Otto hacia este ingeniero ver OTTO, Frei: "A brilliant engineer whose science enhanced architecture", en *Architects' journal*. Vol. 203, nº 2, 1996, Ene. 18. Pág. 12. Ver también OTTO, Frei: "In Memory of Sir Edmund Happold", en A.A.V.V.: *Conceptual Design of Structures. Proceedings of the 1996 IASS Symposium*. Stuttgart, 1996. Vol I. pp. XVII-XVIII.

plana de malla cuadrada de 50 cm. de lado dejada sobre el suelo con todos los nudos articulados. A continuación se fue elevando la celosía mediante torres de andamios para que ésta fuera adoptando su forma tridimensional gracias a la flexibilidad de los listones de madera y a la libertad de giro en los nudos de la celosía. Una vez alcanzada la forma antifunicular los nudos se fijaron fuertemente y se realizaron las conexiones con los elementos de borde. Para asegurar la rigidez de la bóveda se dispuso una segunda celosía pegada a la primera en un 75 % de la superficie, y se reforzó la bóveda con una malla de 4'5 m. de lado formada por parejas de cables, dispuesta diagonalmente en el exterior y fijada a los nudos de la celosía. Finalmente se cubrió la celosía con un tejido de rejilla de poliéster revestido de PVC traslúcido (30 %) ¹⁴⁴. La superficie cubierta fue de 7400 m², llegando a salvar la bóveda una luz máxima de 60 m. y a alcanzar una altura máxima de 20 m. Esta escala representaba pues un salto cualitativo importante con relación a la experiencia acumulada con las bóvedas anteriores, por lo que ya se requería una consideración atenta de fenómenos como el pandeo y los desplazamientos de la bóveda.

Fig. 169. Planta del pabellón de Mannheim. Fuente: IL 10 pág. 308.

169

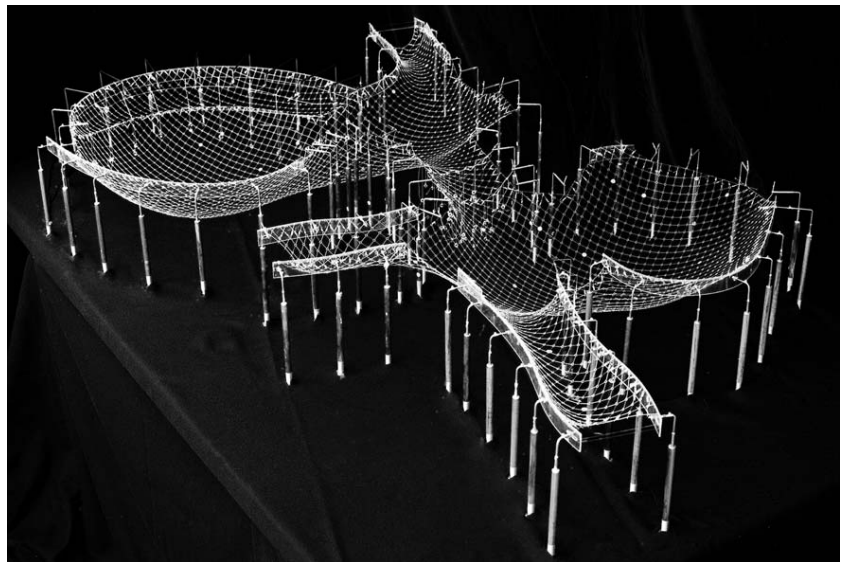
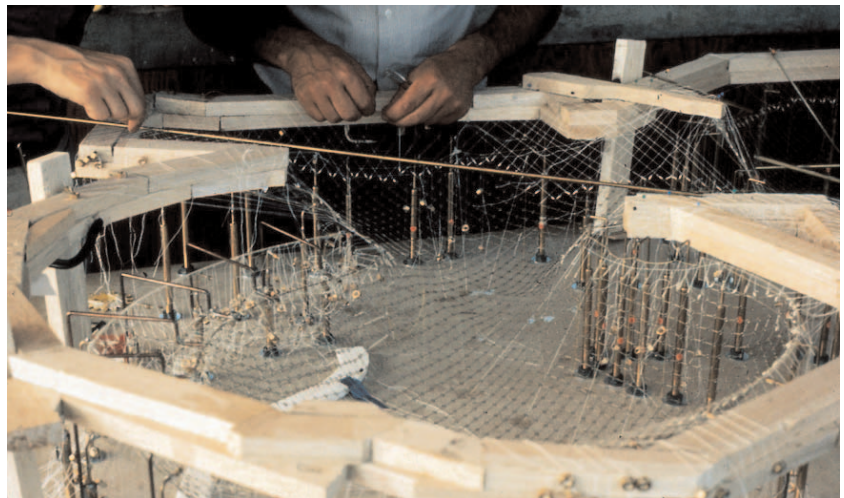


¹⁴⁴ Para una descripción técnica detallada véase HAPPOLD, E. y LIDDELL, W.I.: "Timber lattice roof for the Mannheim Bundesgartenschau", en *The Structural Engineer*, vol. 53, 1975. Pág. 99-135. Véase también A.A.V.V.: *Gitterschalen / Grid shells*. Institut für leichte Flächentragwerke. Stuttgart, 1974. Pág. 308-313.

Fig. 170. Maqueta colgada del pabellón de Mannheim. Fuente: Archivo IL, diapositivas 2.69.54 y 2.69.94

Fig. 171. Maqueta de rejilla de alambre para analizar el proceso de montaje del pabellón de Mannheim. Fuente: Archivo IL, diapo. 2.69.114

Fig. 172. Montaje de la bóveda del pabellón de Mannheim. Fuente: Archivo IL, diapositivas 2.70.43, 2.70.80 y 2.70.93



170 y 171



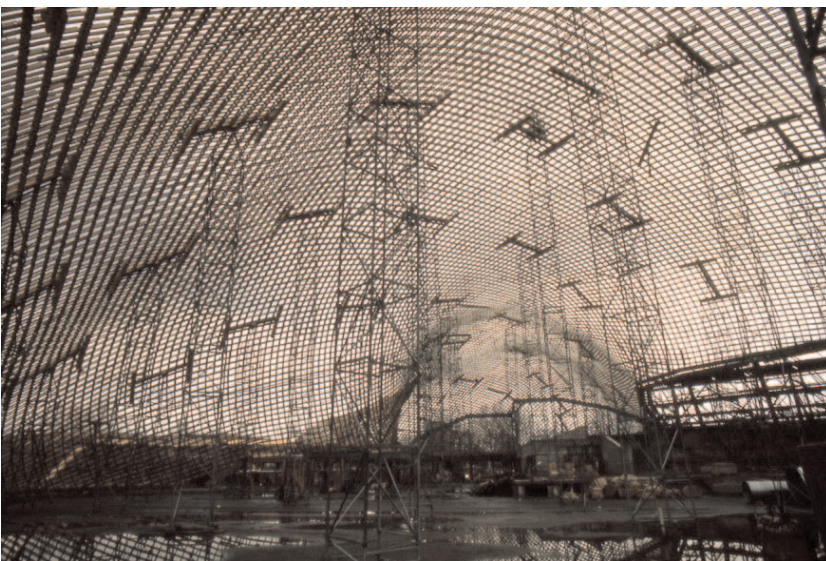
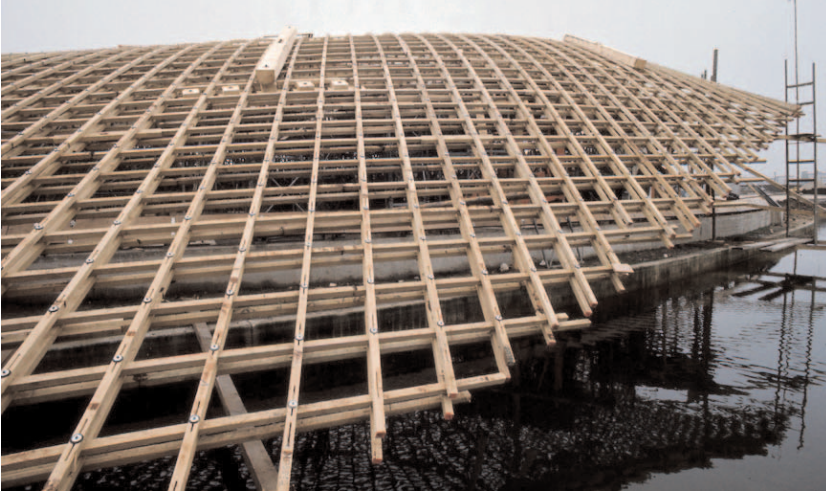


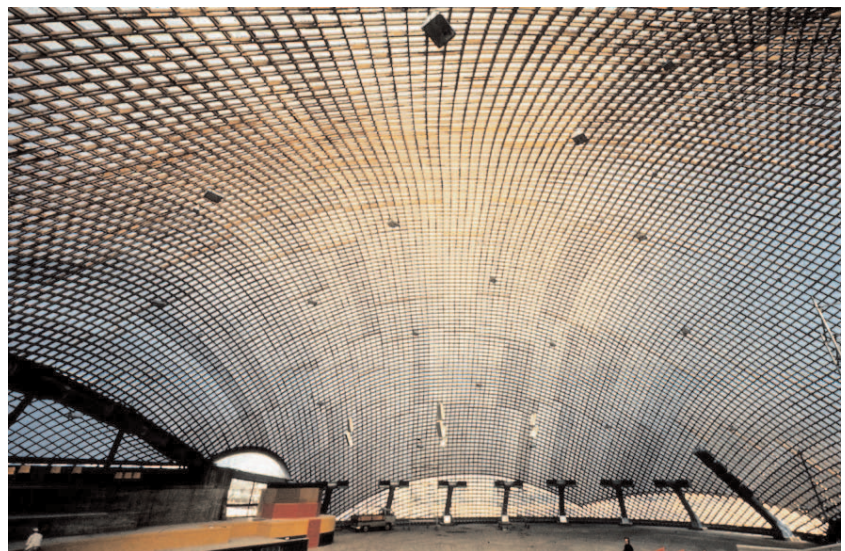
Fig. 173. Pabellón de Mannheim en construcción. Fuente: Archivo IL, diapo. 2.71.13

Fig. 174. Vistas interiores del pabellón de Mannheim. Fuente: Archivo IL, diapositivas 2.78.18 y 2.78.47

Fig. 175. Vista aérea de la bóveda del pabellón de Mannheim. Fuente: WILHELM, Karin: *Portrait Frei Otto*. Quadriga. Berlin, 1985. pág. 140; Archivo IL, diapositiva 7.71.44



173



174





175



VI.2.3. La red de malla uniforme y cuadrada como base para la clasificación y exploración del mundo de las formas de las bóvedas de celosía.

La sistematización de las bóvedas de celosía de capa única fue objeto de un proyecto de investigación conjunto germano-japonés en el que participaron la empresa japonesa SEIBU, que lo financió, el estudio Kenzo Tange, y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart, donde se realizaron las investigaciones. Este proyecto se llevó a cabo entre Mayo de 1971 y Mayo de 1973. Posteriormente, a partir de Junio de 1973 prosiguieron las investigaciones en el marco del programa SFB 64 *Weitgespannte Flächentragwerke* (Estructuras ligeras de grandes luces). Los resultados se publicaron en Noviembre de 1974 en el libro titulado "*Gitterschalen / Grid shells*", el volumen IL 10 de la serie *Mitteilungen* (Informes) del Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart. Esta ha sido la publicación que nos ha servido de base para el análisis de la catalogación de este sistema estructural.

Tal como se ha ido viendo en los apartados anteriores, dentro del epígrafe de las bóvedas de celosía de capa única, la utilización de redes colgantes es esencial para la búsqueda de la forma antifunicular de este tipo de estructuras. Por ello las investigaciones conducentes a una sistematización de las bóvedas de celosía se han basado en formas suspendidas.

Dadas unas condiciones de soporte, una red colgante sometida a su peso propio sólo puede adoptar una única forma suspendida: la configuración de equilibrio. La forma suspendida es una

forma autogenerada. La inversión de la forma suspendida, es decir el reflejo simétrico con respecto al plano horizontal, produce la forma de la bóveda de celosía. Las formas suspendidas con curvatura espacial de las redes colgantes se forman por la variación de los ángulos de las mallas de la red originariamente plana. Así por ejemplo en una red plana de malla cuadrada, los cuadrados se transforman en rombos más o menos pronunciados al colgar la red permitiendo que ésta adquiera una curvatura espacial. La forma de una malla se dice que es cinemática si mantiene constante la distancia entre nudos conectados por líneas de red cuando cambian los ángulos de la malla. El triángulo es la única forma de malla no-cinemática: cuando cambian los ángulos de la malla, varía la distancia entre nudos de la red.

Las bóvedas de celosía de capa única se construyen con barras continuas y rígidas. La red de malla uniforme y cuadrada, a la que nos referiremos a partir de ahora como la "red", es el único tipo de red que cumple las condiciones necesarias para la producción y el montaje de la celosía: líneas de red continuas, distancia entre nudos constante, y forma de malla cinemática. Cuando se cuelga una red de malla cuadrada, deformándose los cuadrados para convertirse en rombos, las líneas de red permanecen continuas. Las barras de las bóvedas de celosía forman dos familias de elementos continuos longitudinales que se cruzan en los nudos. Deben tener suficiente rigidez a compresión, sin perder la flexibilidad para adaptarse a las curvas de la bóveda flexionando ligeramente, y para torsionarse ligeramente con el fin de acoplarse a la otra familia de barras. Todas las maquetas colgan-

tes utilizadas para la sistematización y catalogación de las bóvedas de celosía de capa única han sido, pues, redes de malla uniforme y cuadrada.

Si giramos las imágenes y vemos las redes colgadas en sus formas invertidas podremos imaginarlas como bóvedas de celosía y tener una idea de la variedad de sus formas y de su efecto arquitectónico.

VI.2.4. Los elementos generadores de la forma.

La forma suspendida de una red viene determinada por dos elementos primarios generadores de la forma: la forma de la red en su desarrollo ortogonal, y el tipo y disposición de la suspensión. Los elementos secundarios generadores de la forma de la red colgada son el borde, la arista y el ojo, diferenciando en cada uno tipo y forma.

VI.2.4.1. El desarrollo ortogonal.

La red extendida sobre una superficie plana forma dos familias de líneas rectas. Se establece la siguiente distinción:

- Redes con mallas completas. El borde de la red está formado por líneas de red. La forma del contorno de la red plana desarrollada es un cuadrado o un rectángulo.
- Redes con mallas incompletas. El contorno del borde puede tener cualquier forma, las mallas de borde están cortadas, abiertas, incompletas. La red no termina en líneas de red.

El desarrollo ortogonal constituye el patrón de la red. Cuando la red tiene mallas completas en el borde, el patrón está ya definido. Cuando la red tiene mallas cortadas o incompletas en el borde, el patrón debe determinarse a partir de la forma suspendida mediante un alargamiento o acortamiento gradual y progresivo de los tramos sueltos de las mallas incompletas en el borde, hasta alcanzar una curvatura uniforme y continua de toda la red, evitando descuelgues localizados o puntuales.

VI.2.4.2. La suspensión.

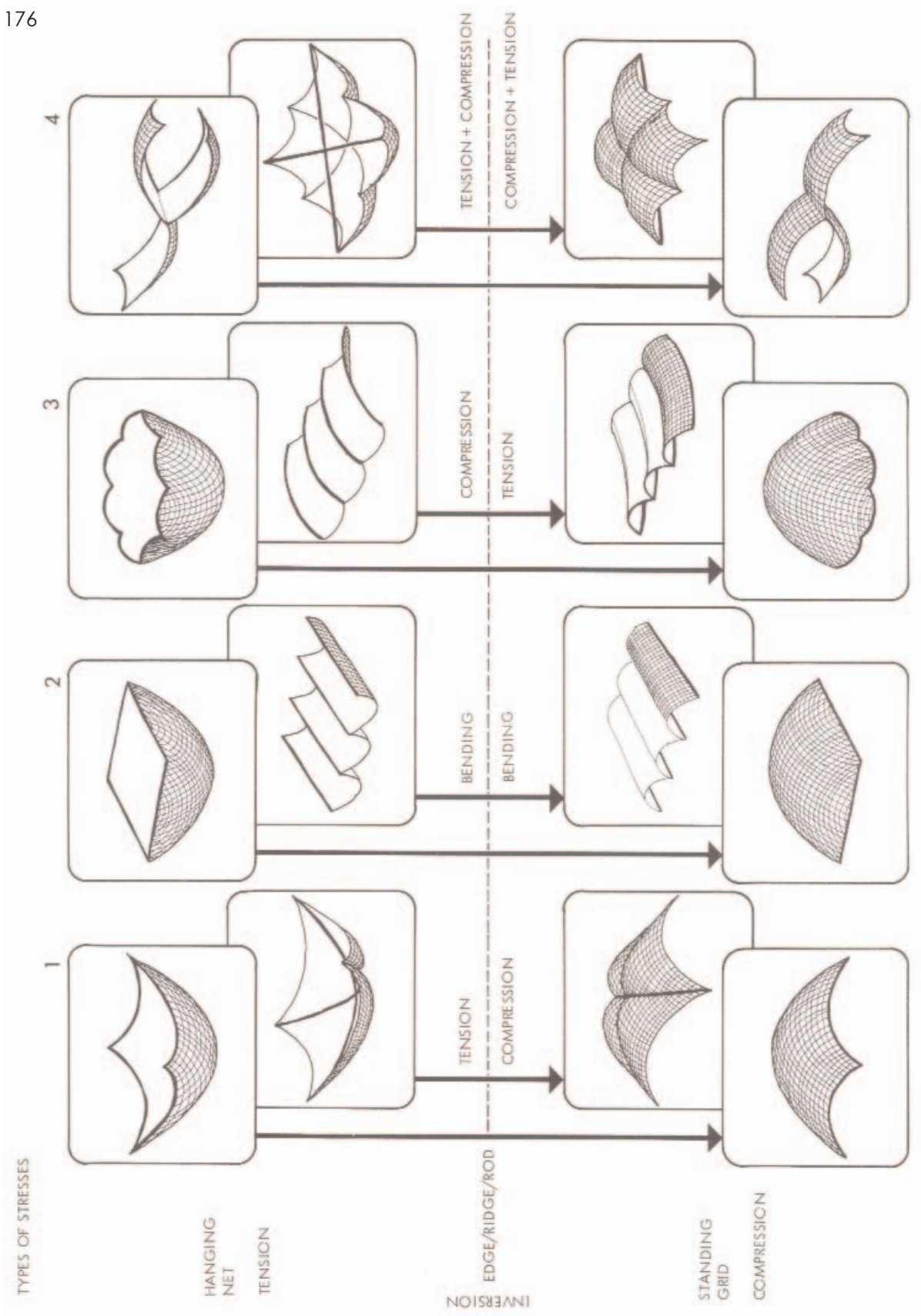
- El punto de suspensión. Cada nudo de la red es un posible punto de suspensión. La distribución de los puntos de suspensión en la red tiene una influencia esencial en la forma suspendida. Las líneas de red que pasan por puntos de suspensión forman aristas.
- La suspensión puntual. La red cuelga de varios puntos distribuidos por la superficie de la red. La forma suspendida no tiene bordes rígidos. Un borde flexible se forma por una línea de borde de la red entre dos puntos de suspensión. Dadas unas condiciones de soporte de la red colgada, la curvatura del borde flexible sólo puede adoptar una forma única: un borde flexible es una forma autogenerada.
- La suspensión lineal. La red cuelga a lo largo de una línea recta o de una curva arbitraria. La forma suspendida tiene bordes rígidos o aristas adicionales, ambos de libre configuración. Un borde rígido está formado por un elemento externo a la red, por ejemplo un alambre con una curvatura prefijada, o un tablero con un hueco interior recortado. Una arista adicional está formada por un elemento externo a la red (por ejemplo una cadena flexible o un alambre rígido), o bien se origina cuando todos los nudos de una determinada línea de red están uno a uno suspendidos.
- Expansión por barra comprimida.

Se puede formar un número infinito de formas suspendidas diferentes a partir de las prácticamente ilimitadas posibilidades de variaciones y combinaciones de los elementos generadores de la forma. Los elementos generadores de la forma de la red colgante se convierten en la bóveda de celosía en elementos constructivos: véase cuadro adjunto (fig. 176).

Vemos en la figura 176 cómo un punto de suspensión de la forma suspendida requiere en la bóveda de celosía un punto de soporte. Un borde o arista flexible en la forma suspendida se transforma en un arco comprimido en la bóveda de celosía (1). Los bordes o aristas rígidos de la forma suspendida requieren vigas rígidas en la bóveda de celosía (2). Los bordes o aristas formados por arcos comprimidos en la forma suspendida se transforman en arcos traccionados en la bóveda de celosía (3). Los elementos comprimidos de la forma suspendida se convierten en elementos traccionados en la bóveda de celosía (4).

Todas estas inversiones del tipo de sollicitación de la forma suspendida se presentan en la bóveda de celosía sólo cuando está sometida a una carga uniformemente repartida sobre la superficie.

176



VI.2.5. Clasificación de las formas suspendidas.

Las formas suspendidas están clasificadas en función del tipo y disposición de la suspensión en el borde y en el interior de la red, y en función de la forma del desarrollo ortogonal.

- A. Redes colgadas verticales.
- B. Redes con borde rígido dividido en dos partes.
- C. Redes con borde rígido abierto.
- D. Redes con borde flexible.
- E. Redes con borde flexible y con puntos de suspensión interiores.
- F. Redes con borde flexible y aristas de forma autogenerada.
- G. Redes con borde flexible y aristas abiertas adicionales.
- H. Redes con borde flexible y aristas cerradas adicionales.
- I. Redes con borde rígido cerrado.
- J. Redes con borde rígido cerrado y aristas abiertas adicionales.
- K. Redes con borde rígido, cerrado y curvado espacialmente.
- L. Redes compuestas.
- M. Redes extendidas por barras comprimidas.
- N. El arco erguido en la red colgada.
- O. El ojo en la red.
- P. Fuerzas externas actuantes sobre la superficie de la red.

Fig. 176. Inversión del tipo de sollicitación y transformación de los elementos generadores de la forma en elementos constructivos al pasar de la forma suspendida a la bóveda de celosía. Fuente: IL 10 pág. 67.

(páginas siguientes)

Fig. 177. Cuadro sinóptico de la clasificación de las formas suspendidas. Fuente: IL 10 pág. 69.

Fig. 178. Muestras de diferentes tipos señalados en la clasificación de las formas suspendidas. Fuente: IL 10 pág. 65.

177

I	
J	
K	
L	
M	
N	
O	
P	

A	
B	
C	
D	
E	
F	
G	
H	



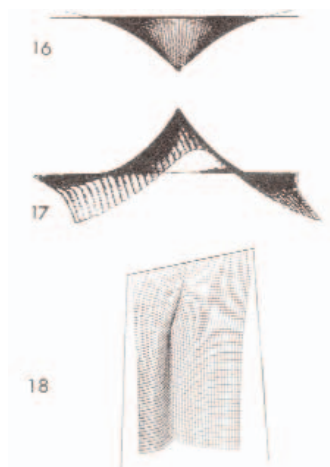
Fig. 179. Redes verticales colgadas de borde rígido recto.
Fuente: IL 10 pág. 71

Fig. 180. Redes verticales colgadas de borde rígido curvo.
Fuente: IL 10 pág. 73.

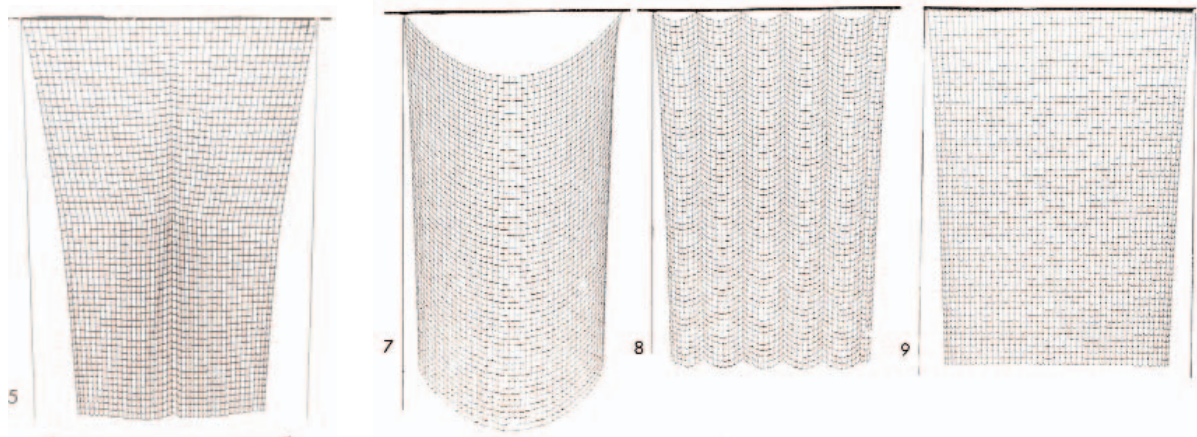
VI.2.5.1. Redes colgadas verticales.

Las redes están suspendidas puntual o linealmente de una línea de borde. Si los puntos de suspensión están contenidos en un plano vertical, la red colgada forma una forma colgada plana. Toda otra disposición de los puntos de suspensión genera formas colgadas curvadas espacialmente. Debido a la distribución de fuerzas por el peso propio, las redes colgadas verticales experimentan una contracción progresiva desde el borde superior colgado hasta el borde inferior libre.

Cuando se tira horizontalmente de un nudo del interior de la red colgada vertical, se genera una forma colgada anticlástica. Las redes catenarias linealmente suspendidas de bordes rígidos curvados contenidos en un plano, generan formas colgadas anticlásticas. A mayor distancia del borde rígido las curvaturas de la forma colgada se hacen más planas.



179



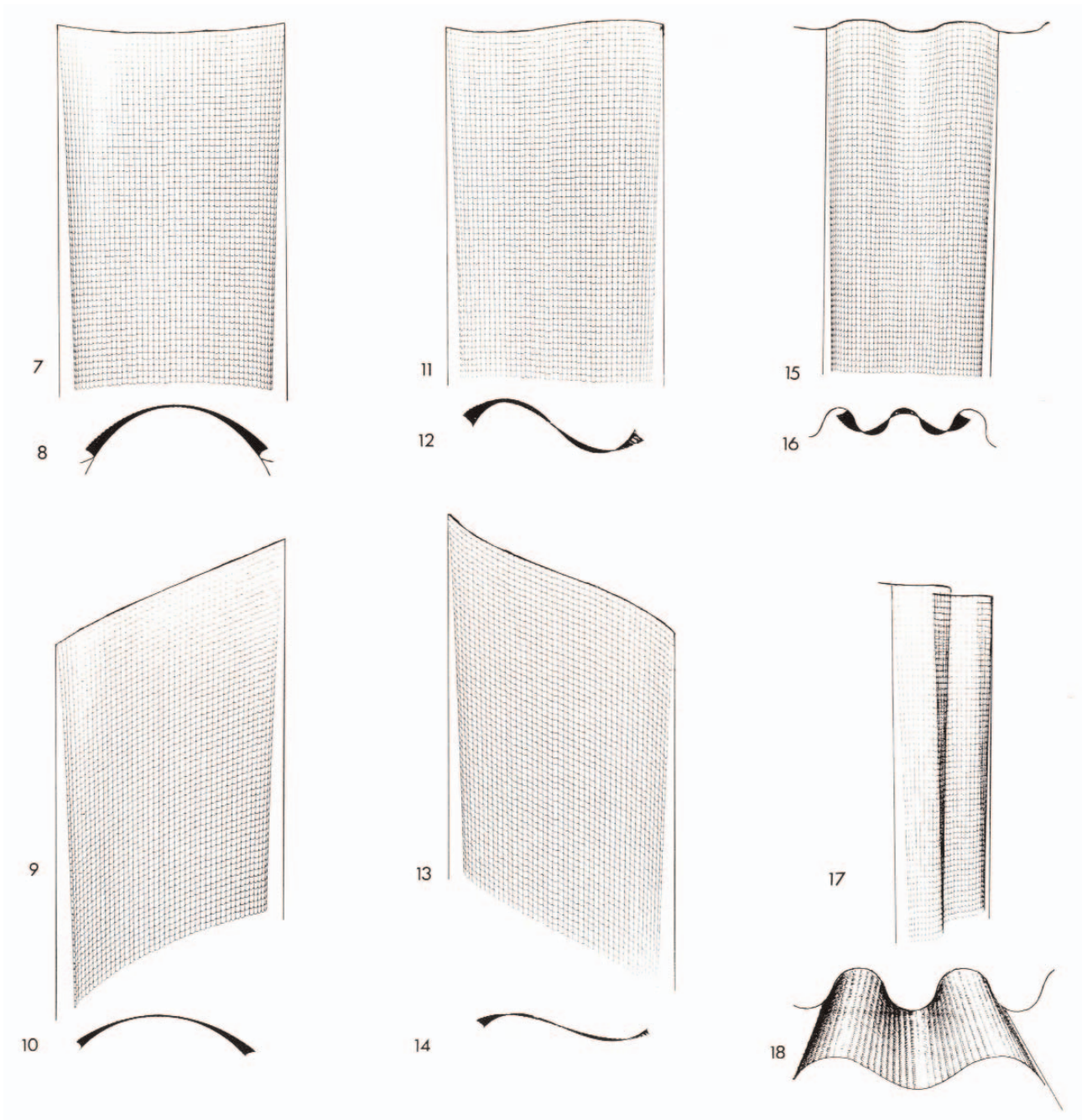


Fig. 181. Redes colgadas de dos bordes rígidos rectos. Fuente: IL 10 pág. 75.

(páginas siguientes)

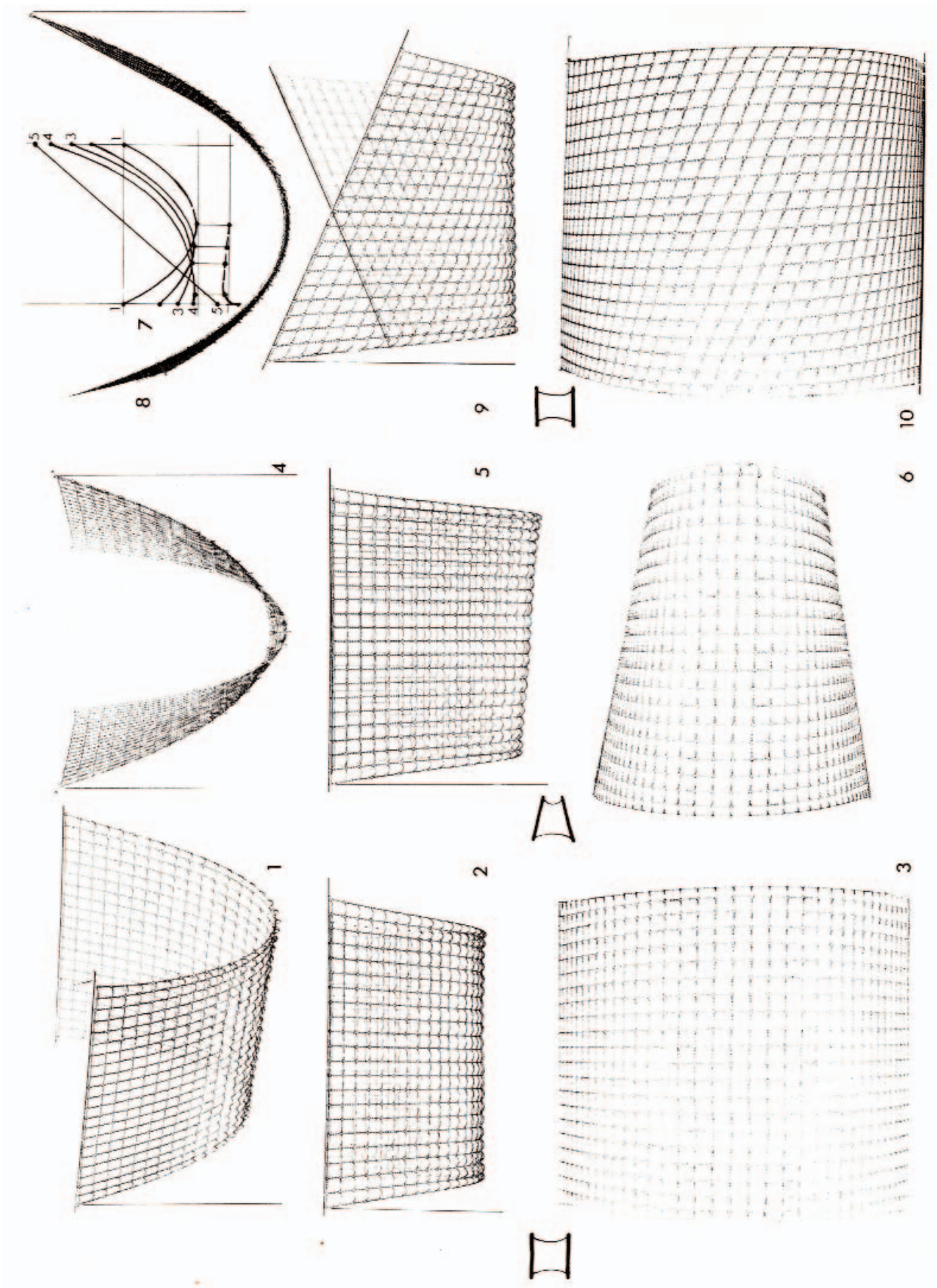
Fig. 182. Redes colgadas de dos bordes rígidos curvados. Fuente: IL 10 pág. 77.

Fig. 183. Red colgada de dos bordes rígidos rectos con mallas incompletas en estos bordes. Fuente: IL 10 pág. 78.

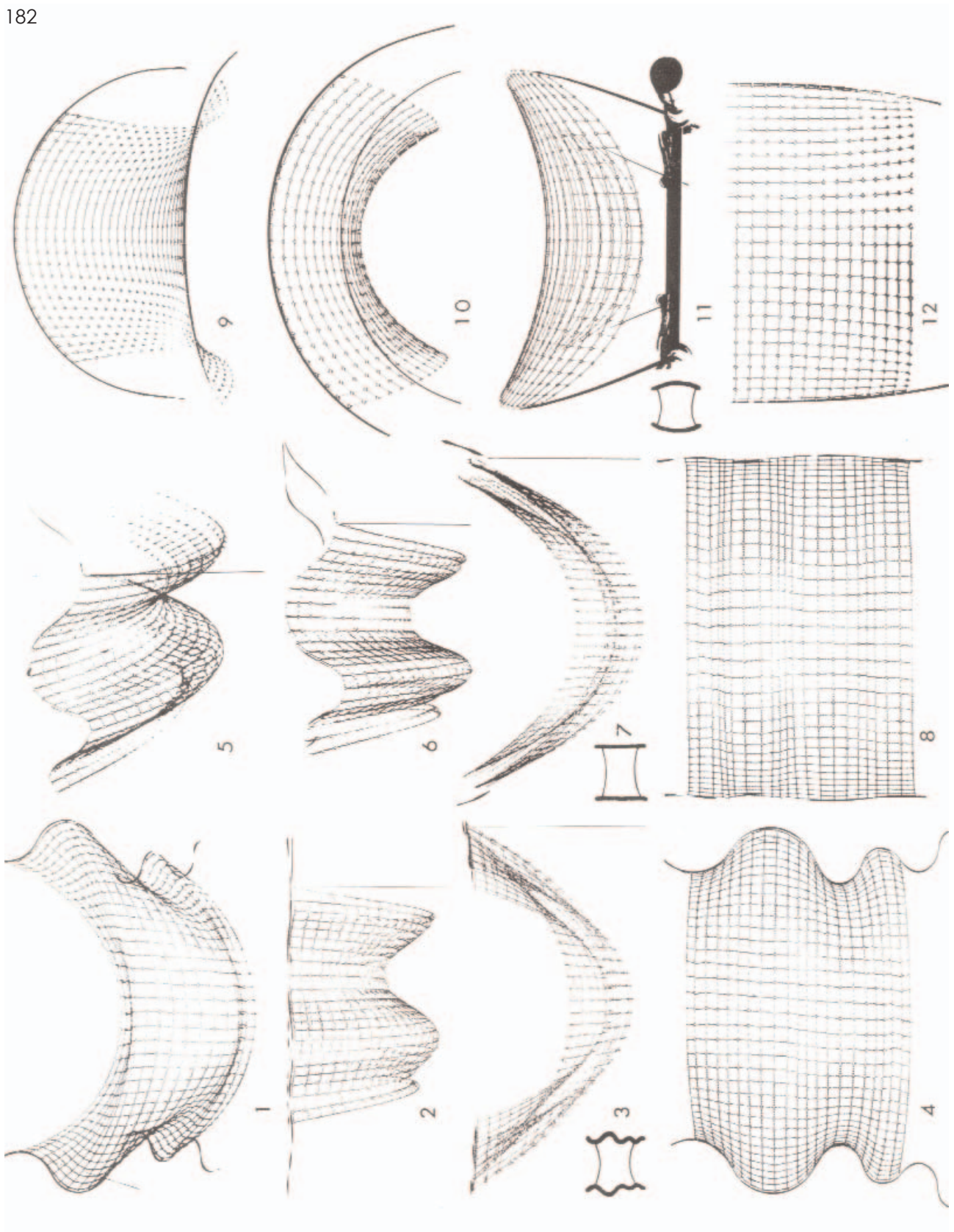
VI.2.5.2. Redes con borde rígido dividido en dos partes.

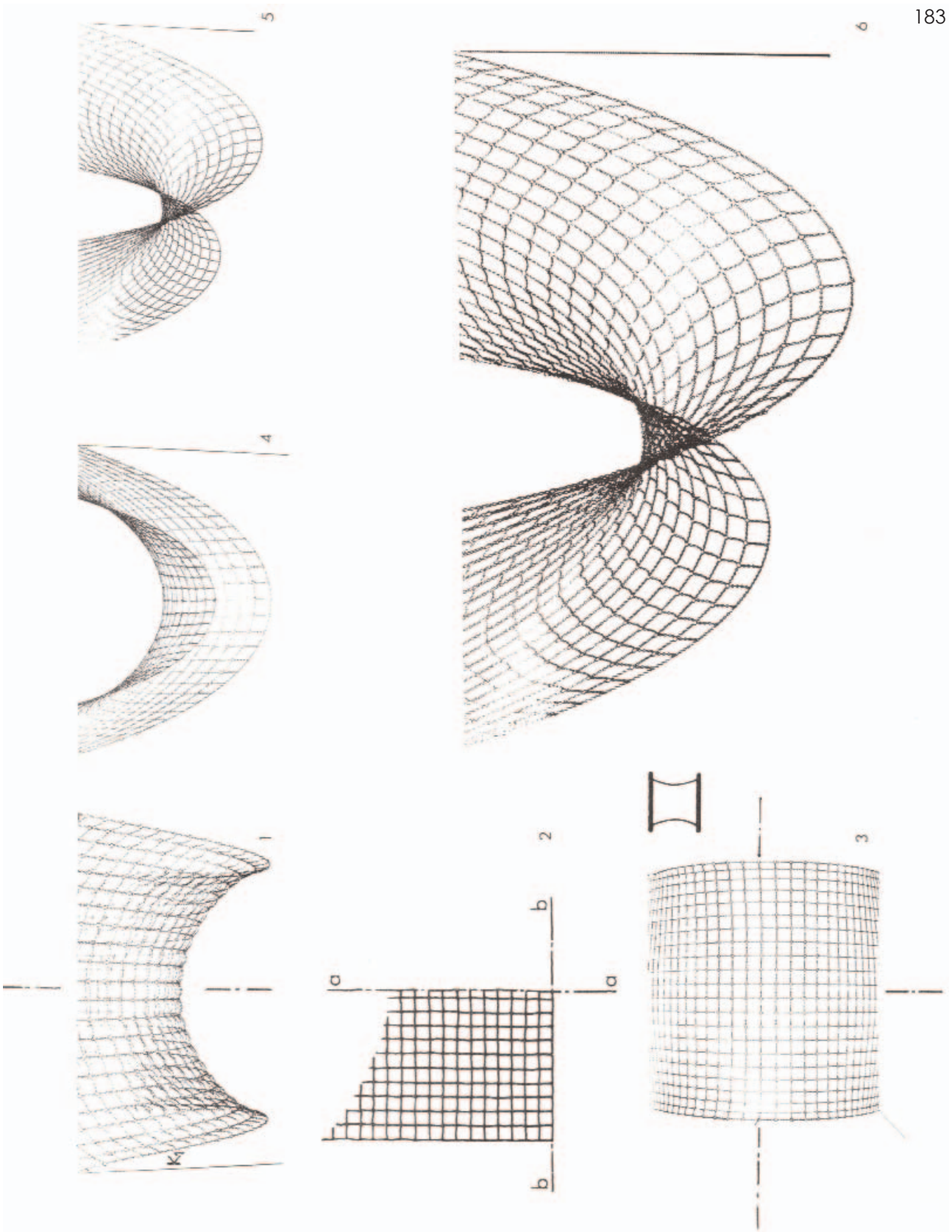
Estas redes cuelgan de dos bordes rígidos situados uno frente al otro. Los otros dos bordes de estas redes son flexibles. Las mallas de la red situadas a lo largo de los bordes rígidos pueden ser completas (fig. 181 y 182) o incompletas (fig. 183). La forma suspendida va variando por la modificación de la posición relativa de las dos barras de borde. Las vistas inferiores de las formas suspendidas están deformadas en el muestrario de combinaciones y relaciones, debido al uso de un objetivo de gran angular.

En la combinatoria planteada aparecen bordes rígidos rectos (fig. 181 y 183) y curvos (fig. 182). Los bordes rectos aparecen contenidos en un mismo plano horizontal y paralelos (fig. 181.1-3 y 183) o bien oblicuos (fig. 181.4-6). También aparecen oblicuos pero contenidos en sendos planos verticales paralelos (fig. 181.8-10). Los bordes rígidos curvos forman ondulaciones simétricas contenidas en un mismo plano horizontal (fig. 182.1-4) o bien contenidas en sendos planos verticales paralelos (fig. 182.5-8). También se plantean bordes rígidos curvos en forma de arco inclinado (fig. 182.9-12).



182

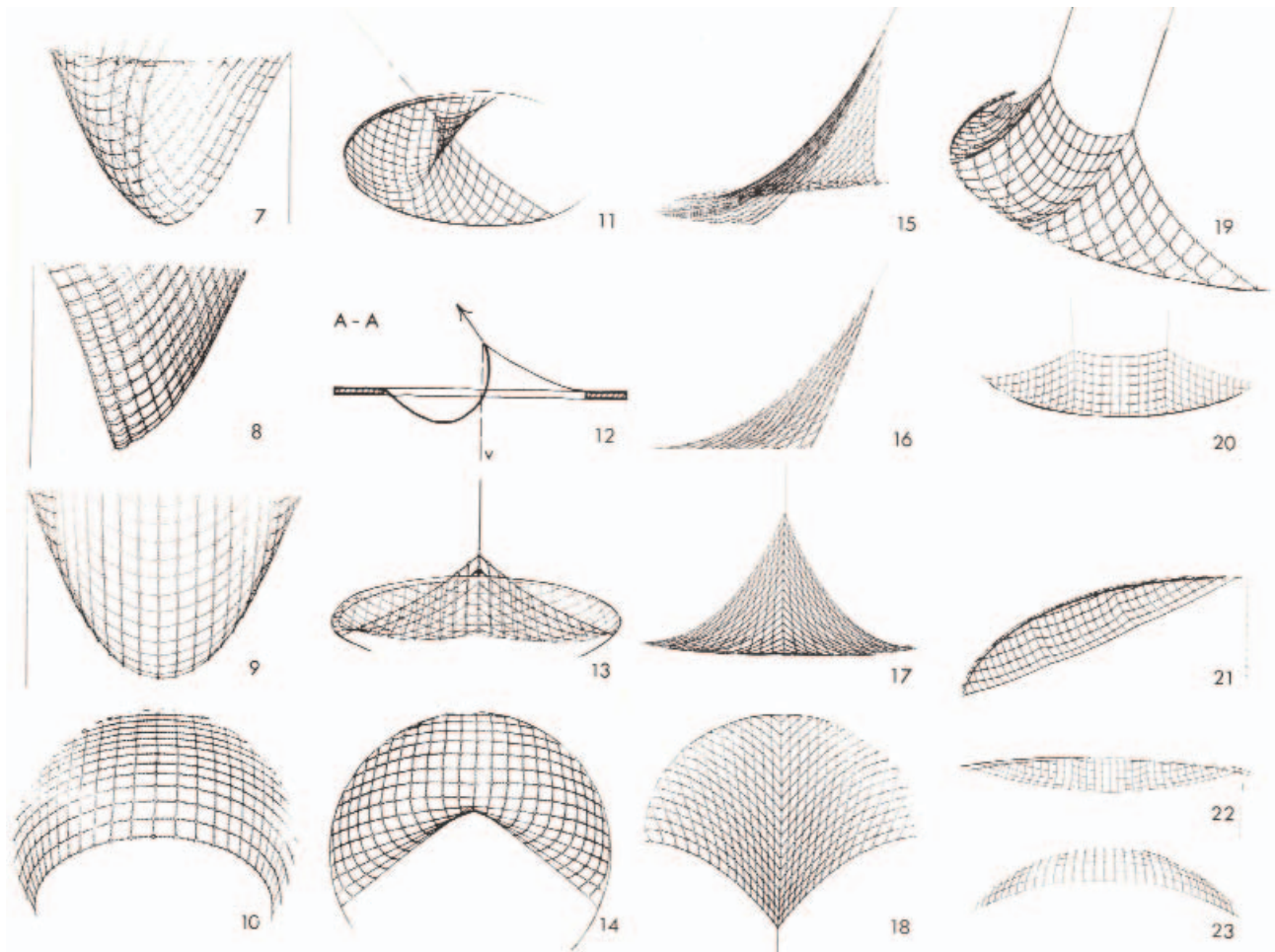




VI.2.5.3. Redes con borde rígido abierto.

Los bordes que se plantean tienen forma de arco de circunferencia y están contenidos en un plano horizontal. Las mallas de la red situadas a lo largo de los bordes rígidos son incompletas. Aparecen cinco formas suspendidas diferenciadas por la forma del desarrollo ortogonal y por el tipo y disposición de la suspensión (fig. 184).

Fig. 184. Redes con borde rígido abierto. Fuente: IL 10 pág. 79



VI.2.5.4. Redes con borde rígido cerrado.

El borde rígido cerrado puede asumir cualquier forma. Puede estar contenido en un plano o en una superficie curvada espacialmente. Puede seguir un trazado poligonal rectilíneo, o bien un trazado curvado continuo o discontinuo. En esta categoría de la clasificación sólo se plantean las formas suspendidas con bordes rígidos cerrados curvados contenidos en un plano, y sin ningún borde flexible. La red está linealmente suspendida a lo largo del borde rígido. La forma de la red ortogonalmente desarrollada hay que determinarla, es decir, dado un borde rígido hay un gran número de formas suspendidas diferentes que se pueden formar. En todas ellas las mallas situadas a lo largo del borde rígido son incompletas.

La clasificación presenta diferentes variaciones de formas suspendidas con borde rígido cuadrado, cambiando en cada una de ellas el desarrollo ortogonal de la red (fig. 185). En todas ellas se mantiene constante un área de la red de 26 x 26 mallas. Hay una forma sinclástica sin ondulaciones y con pequeñas zonas de curvatura anticlástica junto a las esquinas (fig. 185.1-4). Luego aparecen formas suspendidas con ondulaciones, producidas al contraer la red un mismo número de mallas en lados opuestos del borde cuadrado. Así aparece una forma suspendida con una ondulación simétrica (fig. 185.5-9), con dos ondulaciones formando una T (fig. 185.10-14), con dos ondulaciones que se cruzan en los ejes de simetría (fig. 185.15-19), o con una ondulación excéntrica (fig. 185.20-21). En la zona de las ondulaciones y en las esquinas del borde rígido todas las formas suspendidas son anticlásticas.

(páginas siguientes)

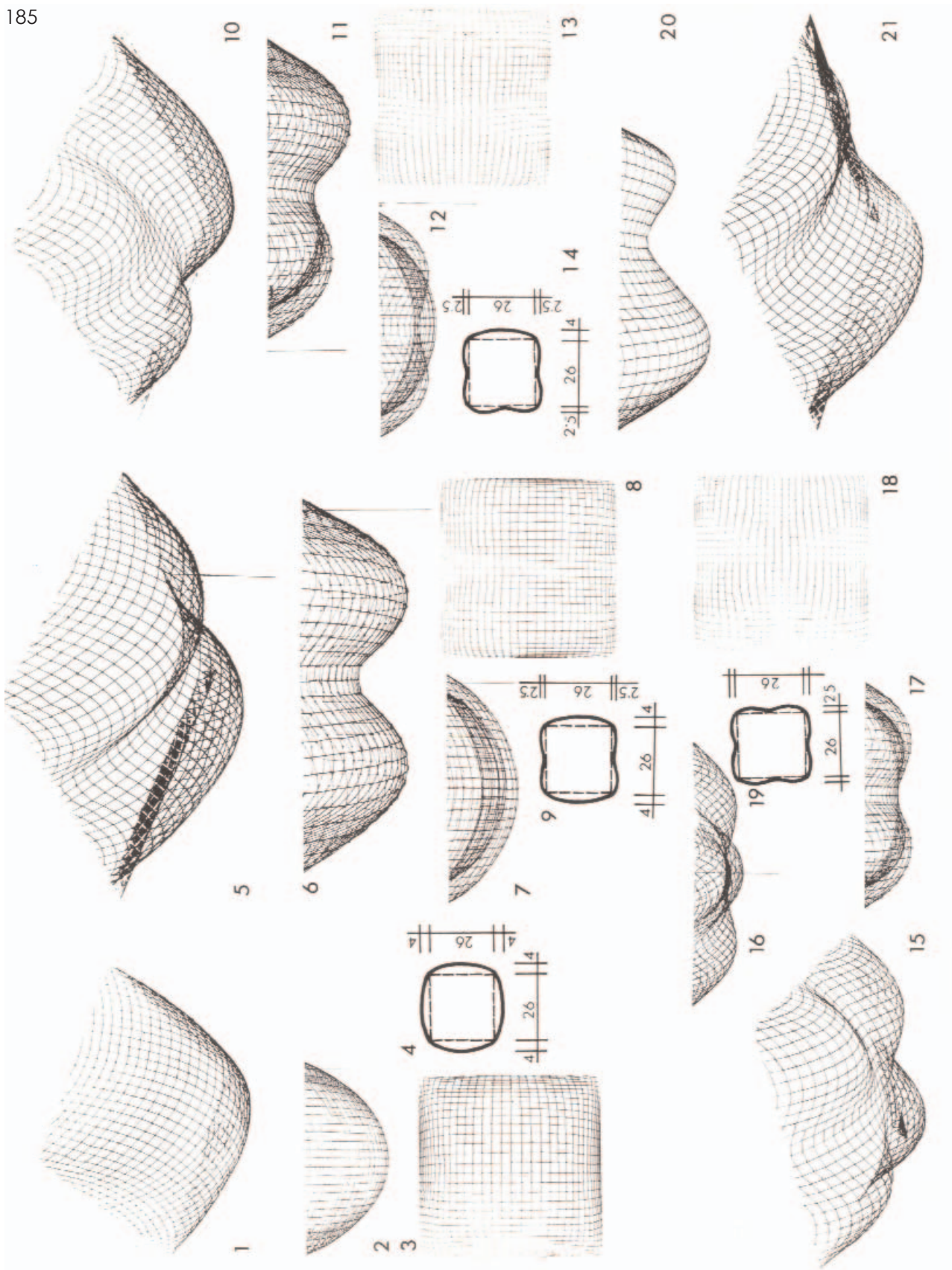
Fig. 185. Formas suspendidas con borde rígido cuadrado. Fuente: IL 10 pág. 81.

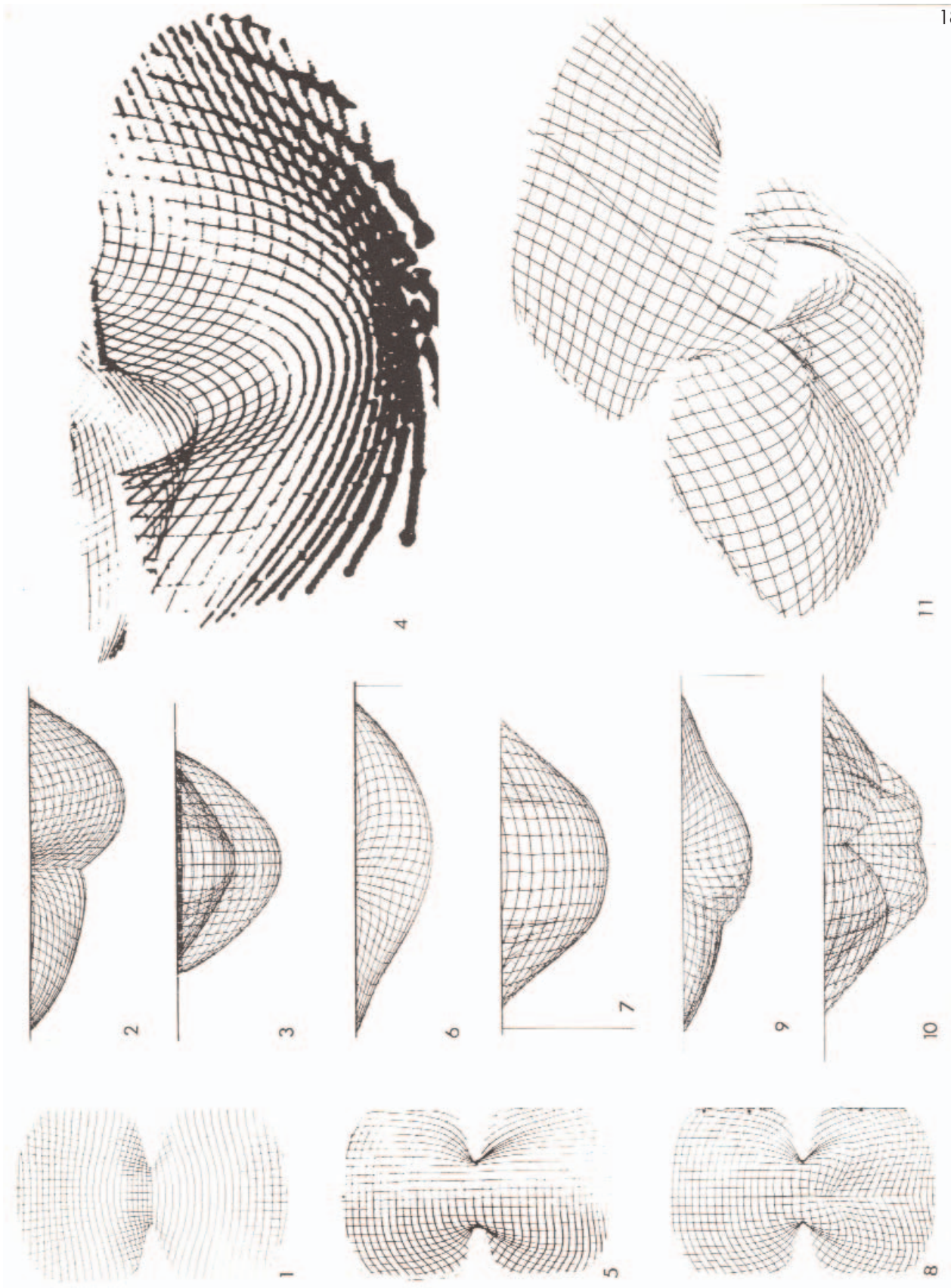
Fig. 186. Diferentes formas suspendidas con un mismo borde rígido formado por dos entrantes en punta redondeada. Fuente: IL 10 pág. 83

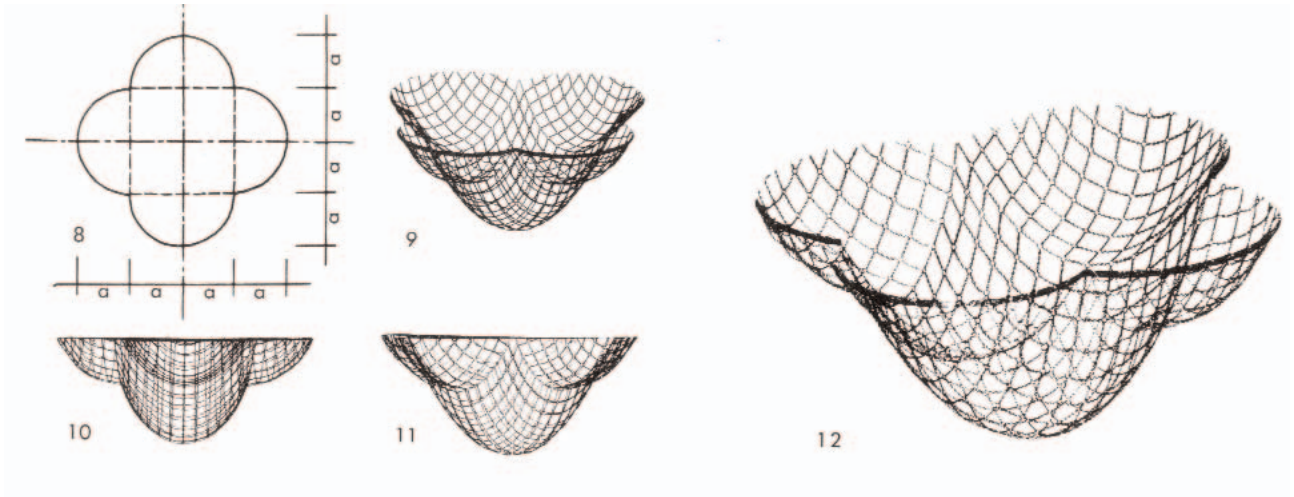
Fig. 187. Forma suspendida con bordes rígidos semicirculares dispuestos según dos ejes de simetría perpendiculares, formando cinco cúpulas. Fuente: IL 10 pág. 85

Fig. 188. Forma suspendida con borde rígido formando entrantes y salientes. Fuente: IL 10 pág. 85

185

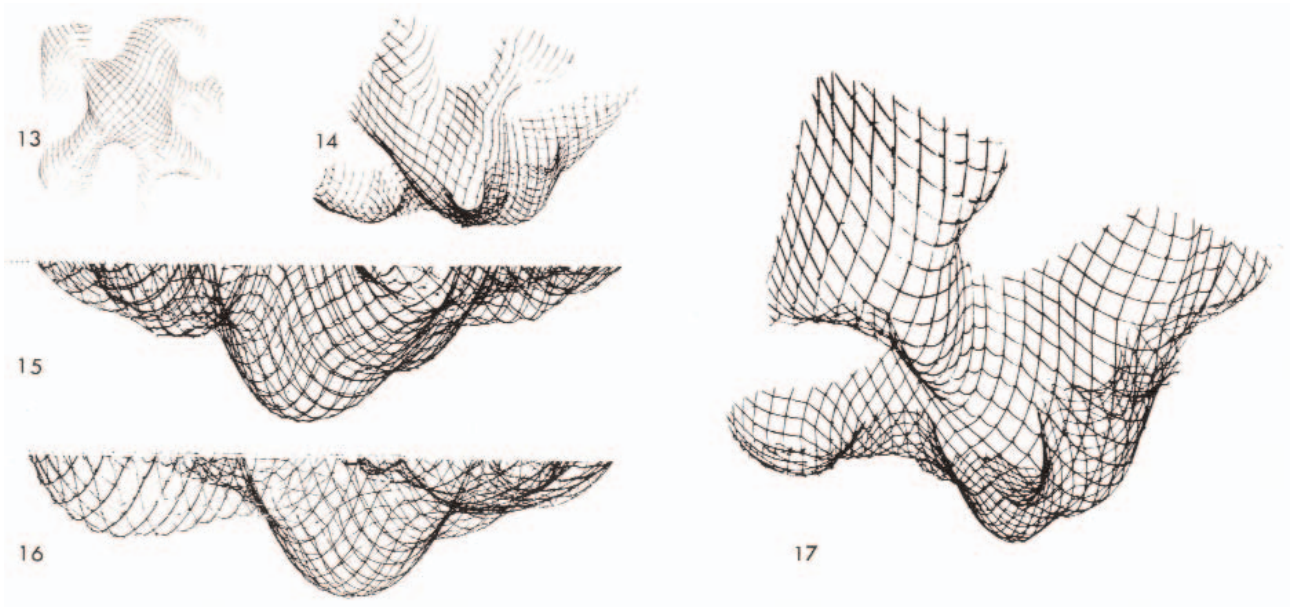






187

188



VI.2.5.5. Redes con borde flexible.

Las redes cuyo desarrollo ortogonal es rectangular o cuadrado, tienen en el borde sólo mallas completas, y se cuelgan de sus esquinas. Las líneas de borde de la red forman bordes flexibles en la forma suspendida, que adoptan un trazado determinado según las condiciones de soporte de la red colgada. Es una forma autogenerada. Siendo cóncavo con respecto a los puntos de suspensión, el borde flexible está contenido en una superficie con una ligera curvatura espacial. La inclinación de esta superficie con respecto al plano horizontal depende de la relación entre la flecha del borde y la distancia entre los puntos de suspensión.

Una red cuadrada de 24 x 24 mallas, colgada de sus cuatro esquinas, estando los puntos de suspensión contenidos en un plano horizontal, presenta una curvatura sinclástica en su mayor parte, apareciendo tan solo pequeñas áreas alrededor de las esquinas con curvatura anticlástica (fig. 189.1-3). Cuanto mayor es la distancia entre los puntos de suspensión, mayores son las zonas de curvatura anticlástica. Las variaciones de los ángulos de las mallas se producen en mayor medida en las diagonales, y disminuyen cuando la distancia entre los puntos de apoyo aumenta. No se aprecian descuelgues localizados en tramos individuales de la red.

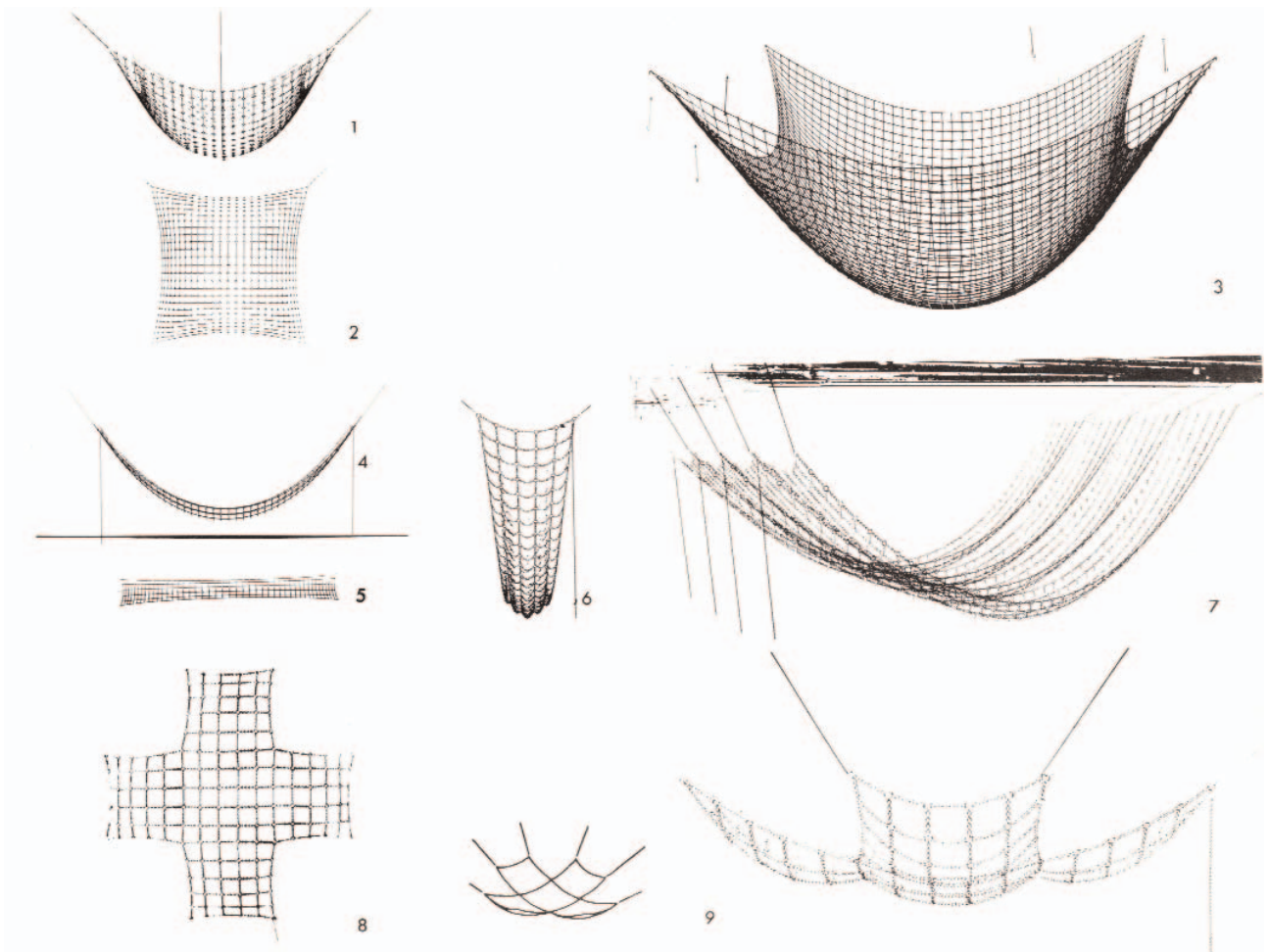
Una red rectangular de 5 x 44 mallas, colgada de sus cuatro esquinas, estando los puntos de suspensión contenidos en un plano horizontal, presenta una forma suspendida muy alargada en la que aparecen fuertes descuelgues localizados en las líneas transversales de la red (fig. 189.4-6). Estos descuelgues son

Fig. 189. Redes con borde flexible. Fuente: IL 10 pág. 89.

mayores cuanto mayor es la distancia de los puntos de suspensión, y se pueden reducir con barras comprimidas dispuestas en dirección transversal. Esta red rectangular también aparece en la clasificación combinada con otras iguales por adición a lo largo del eje transversal (fig. 189.7).

La clasificación presenta también una red en forma de cruz griega colgada de ocho esquinas, estando los puntos de suspensión en un plano horizontal (fig. 189.8-9). Las líneas de la red que unen las cuatro esquinas interiores producen cuatro aristas autogeneradas. La forma suspendida es sinclástica.

189



VI.2.5.6. Redes con aristas abiertas.

Las aristas forman líneas que interrumpen la curvatura continua de una forma suspendida. Todas las líneas de red que cruzan una arista tienen un quiebro en el punto de cruce. Las aristas desvían las fuerzas desde el interior hacia el exterior de la red. Las aristas abiertas atraviesan una forma suspendida desde un borde a otro borde de la red, o bien recorren la red desde su interior hacia fuera. Se obtienen aristas autogeneradas a partir de las líneas de red que, o bien atraviesan puntos de suspensión (fig. 190), o bien están especialmente sujetas a un borde rígido (fig. 184.21-23; 186.1-4; 187).

Se forman aristas adicionales cuando se utilizan elementos constructivos extraños a la red. Su trayectoria es independiente de la de las líneas de la red. La clasificación distingue entre aristas adicionales flexibles y rígidas. La red no está fijada a la arista adicional.

Fig. 190. Red con bordes flexibles y aristas abiertas autogeneradas. Fuente: IL 10 pág. 93

190

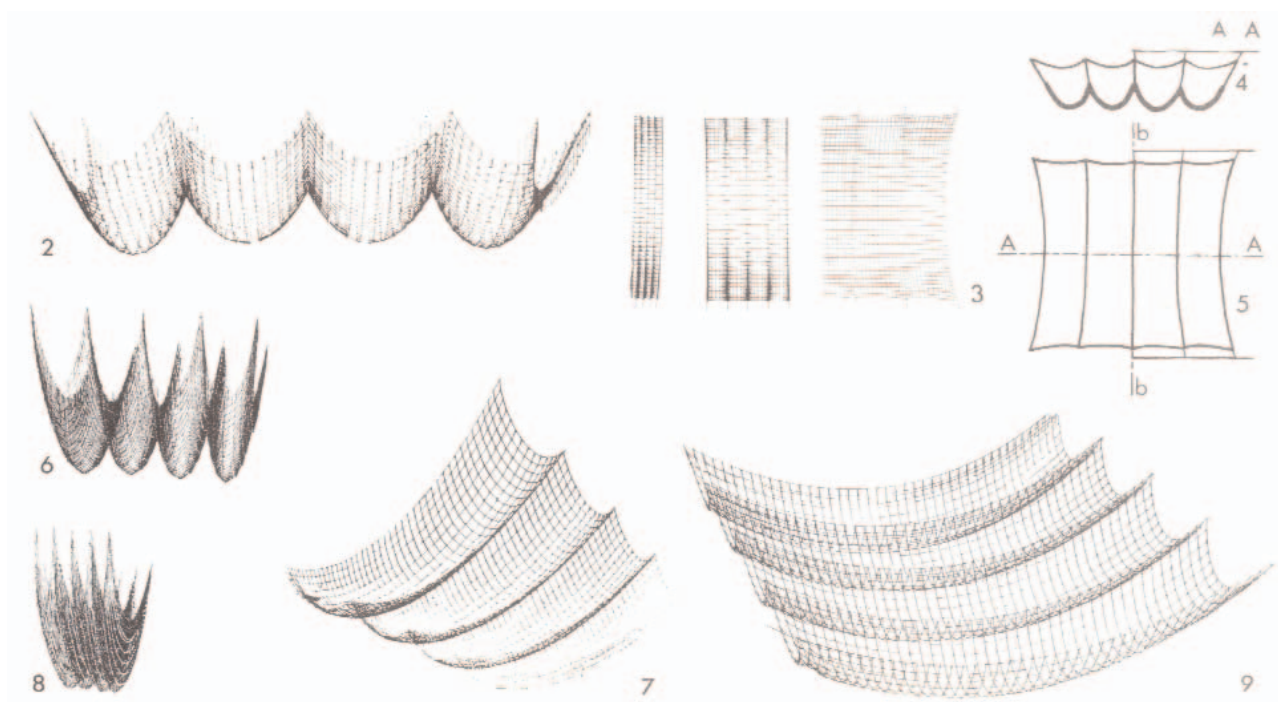


Fig. 191. Red con bordes flexibles y aristas abiertas adicionales y flexibles. Fuente: IL 10 pág. 95

Fig. 192. Red con bordes flexibles y ocho aristas abiertas adicionales y flexibles que se cruzan. Fuente: IL 10 pág. 96

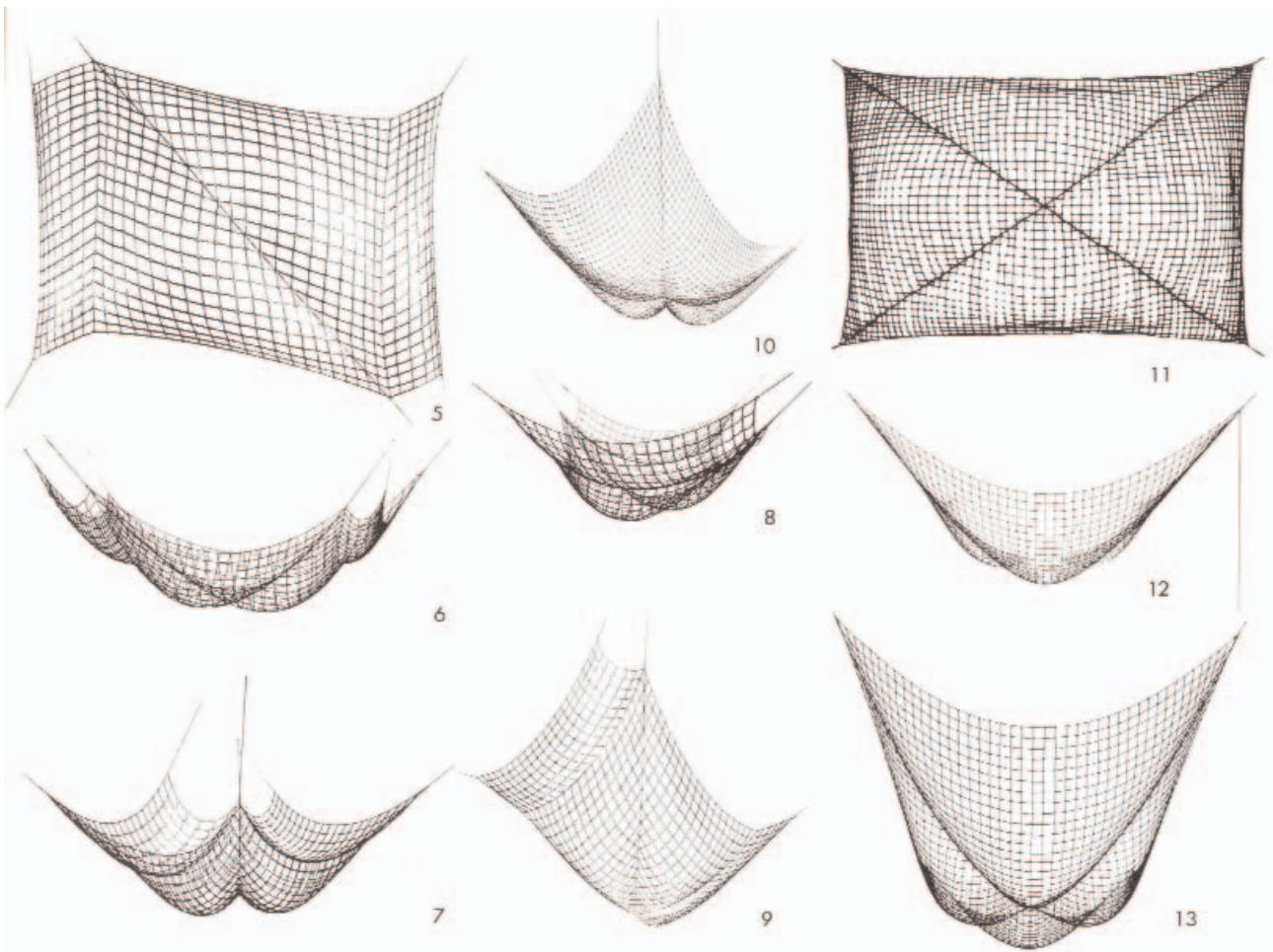
(página siguiente)

Fig. 193. Formas suspendidas con borde rígido cuadrado y aristas abiertas adicionales y rígidas. Fuente: IL 10 pág. 97

Para formar aristas adicionales flexibles se disponen cadenas adicionales debajo de la red catenaria colgante. Las líneas de la red que terminan en las intersecciones de los bordes flexibles con las aristas adicionales forman aristas autogeneradas, ya que esta situación es equivalente a un punto de suspensión. La cadena que forma la arista adicional está atada a los bordes flexibles (fig. 191.5-9).

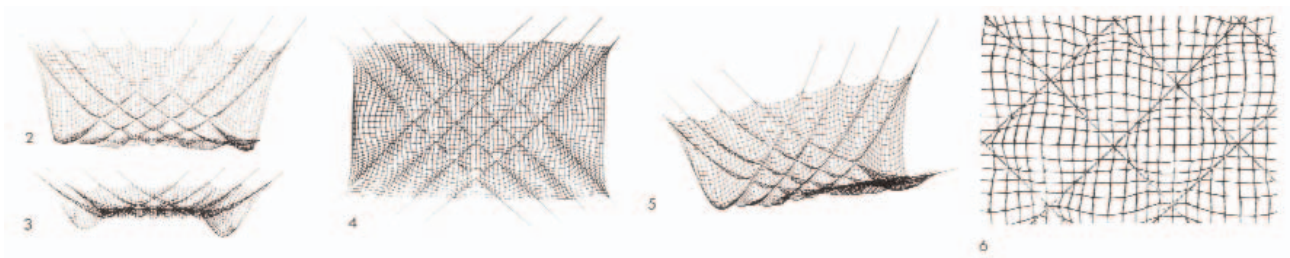
La clasificación presenta también, dentro de esta categoría, formas suspendidas con dos (fig. 191.10-13) y con ocho (fig. 192) aristas abiertas adicionales y flexibles que se cruzan.

Las aristas adicionales rígidas pueden adoptar cualquier forma, y son insertadas desde abajo en una maqueta colgante preexistente (fig. 193). En la clasificación se considera como forma de partida una maqueta de borde rígido cuadrado (fig. 193.10-11). Si la arista adicional rígida tiene un quiebro en la superficie de la red, entonces las líneas de la red que pasan por el punto de quiebro producen aristas autogeneradas (fig. 193.17, 18, 22).

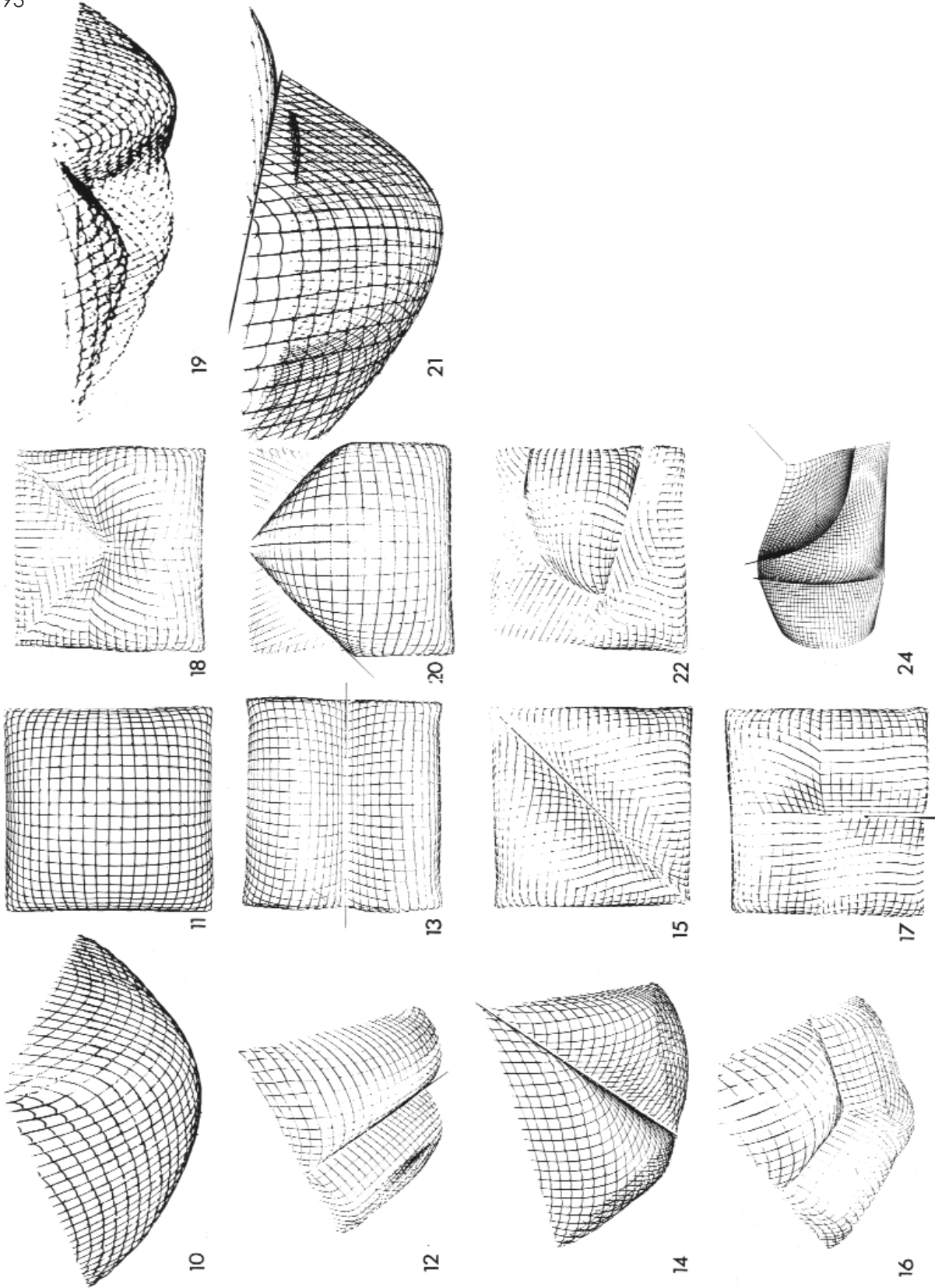


191

192



193



VI.2.5.7. Redes con aristas cerradas.

Las aristas cerradas son formas especiales de aristas adicionales. Siguen una trayectoria en el interior de la red formada por curvas o polígonos, planos o espaciales. En la clasificación se distingue entre aristas cerradas flexibles y rígidas. Las aristas cerradas flexibles están formadas por cadenas cerradas suspendidas de varios puntos y dispuestas debajo de la red colgante. Con respecto a las aristas cerradas rígidas, cualquier forma es posible. Las aristas son alambres de acero previamente curvados, que se cuelgan debajo de la red colgada. La arista puede tener un quiebro (fig. 194.9-12). Las líneas de la red que atraviesan el punto de quiebro producen aristas autogeneradas.

Fig. 194. Redes con bordes flexibles colgadas de cuatro esquinas con aristas cerradas adicionales y rígidas. Fuente: IL 10 pág. 99

194

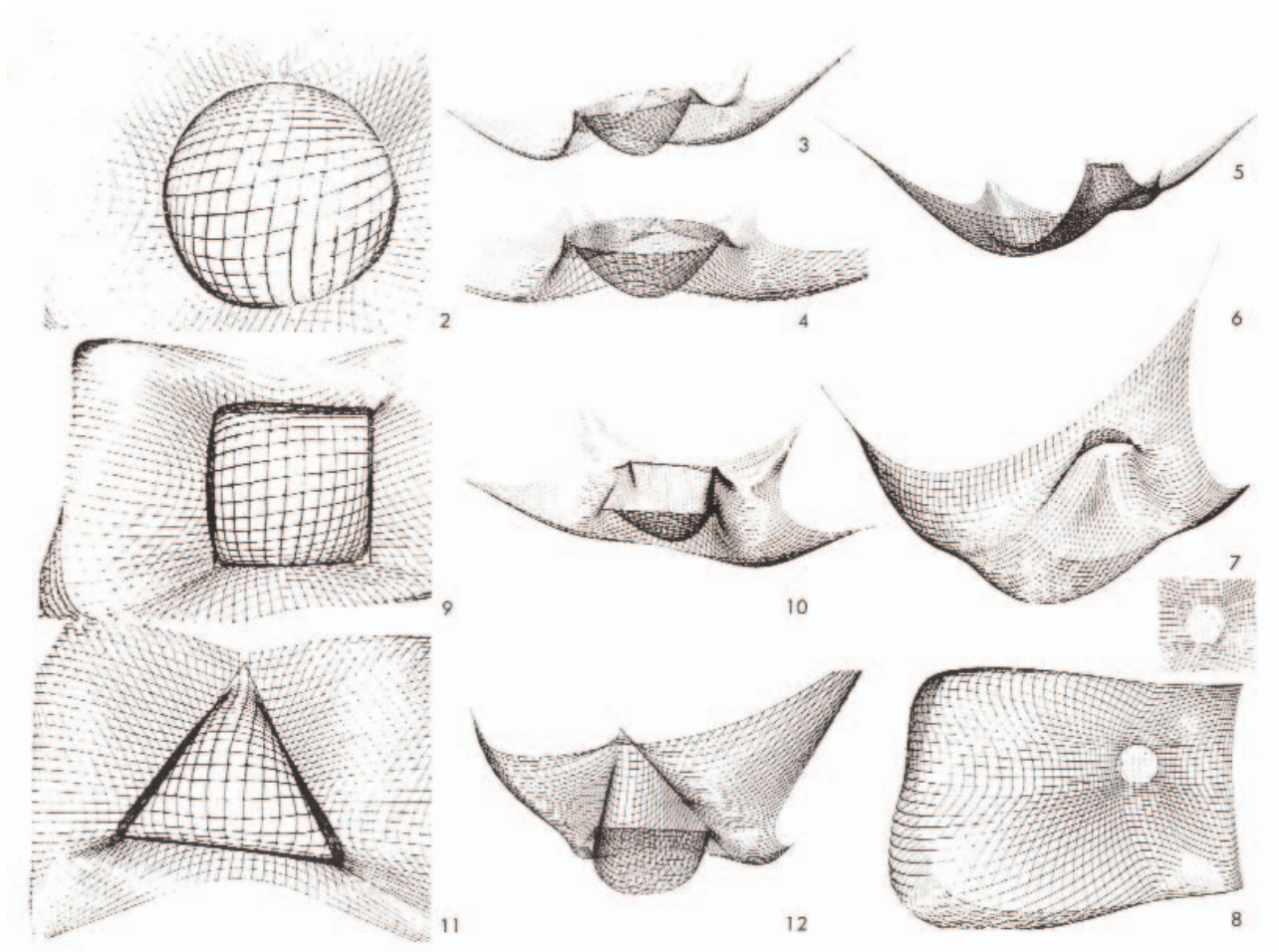


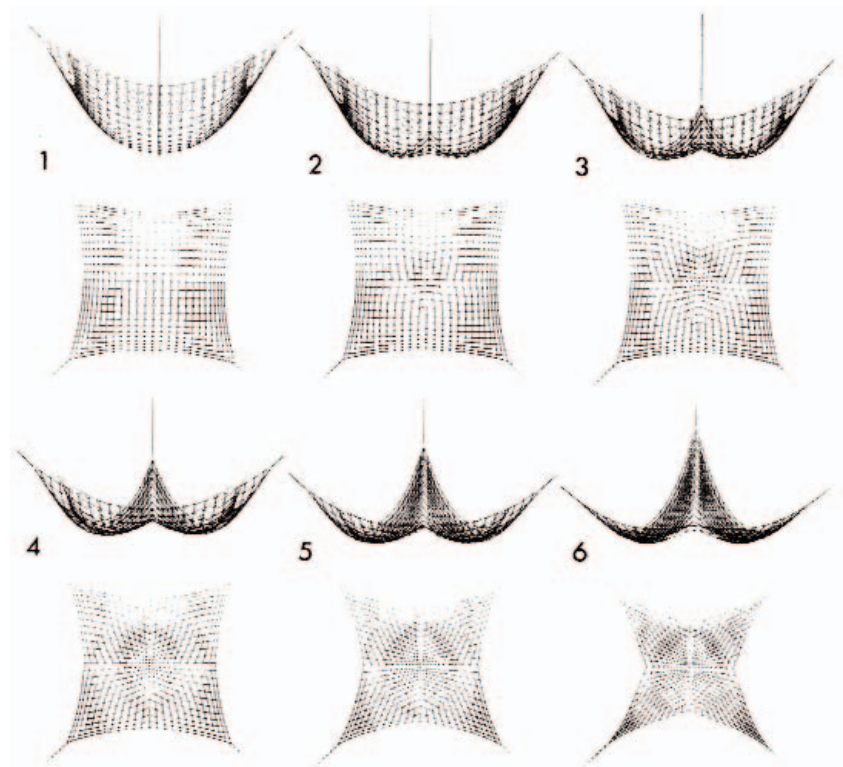
Fig. 195. Red cuadrada colgada de sus cuatro esquinas dispuestas en un plano horizontal, con otro punto de suspensión en el nudo central de altura cada vez mayor. Fuente: IL 10 pág. 101

Fig. 196. Red con puntos de suspensión interiores dispuestos a la misma altura y en retícula. Fuente: IL 10 pág. 102

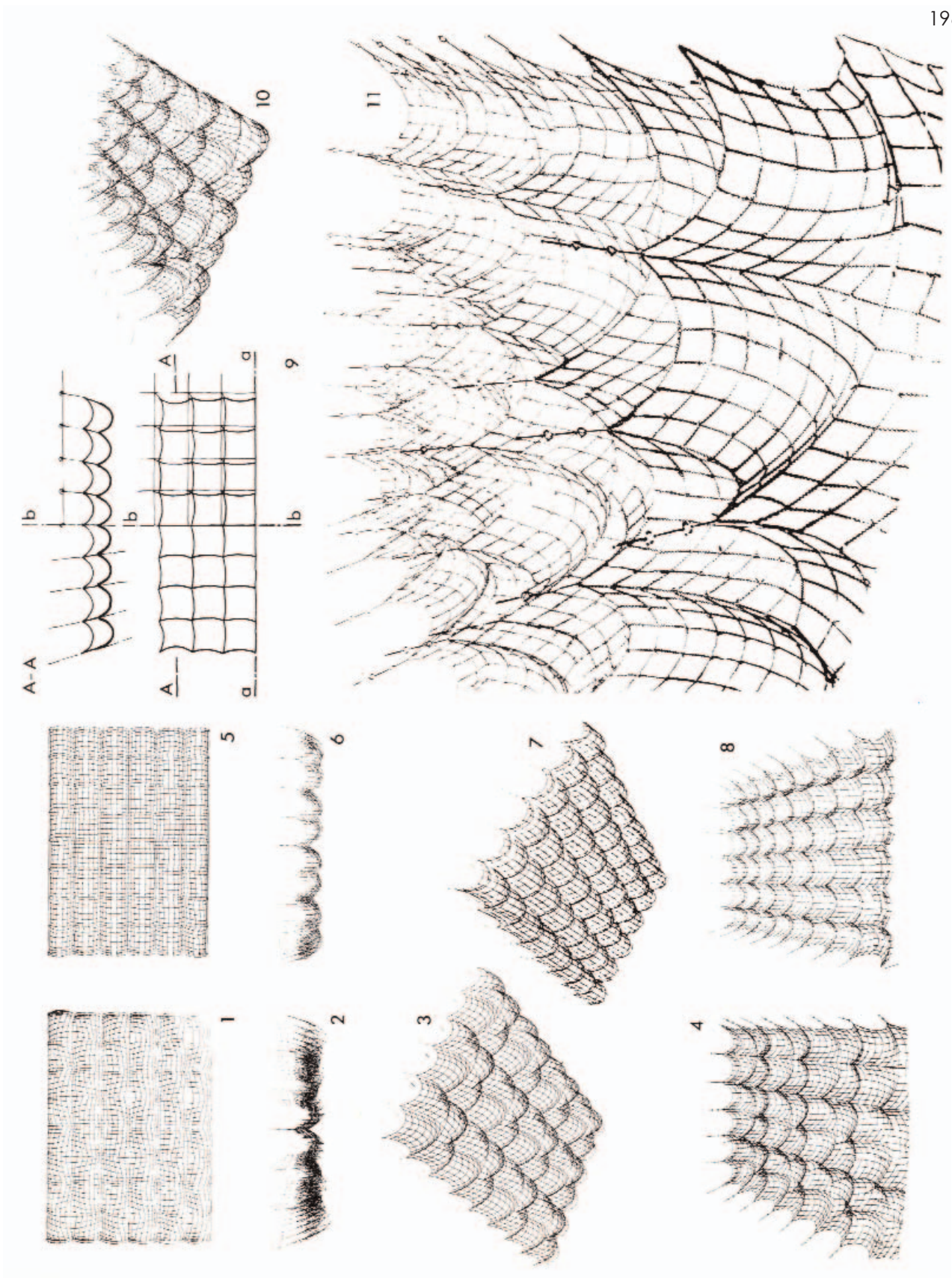
VI.2.5.8. Redes con puntos de suspensión interiores.

Cada nudo de una red es un punto de suspensión potencial. Las dos líneas de red que se cruzan en el nudo producen aristas autogeneradas. Según la posición y altura de un punto de suspensión con respecto a la situación general de la red colgada, las aristas atraviesan toda la forma suspendida (fig. 195.4-6) o se extinguen en el interior de la red (fig. 195.2).

La clasificación presenta una red catenaria de 42 x 58 mallas, cuyos puntos de suspensión cuelgan a la misma altura de una retícula horizontal formada por alambres de acero pretensados (fig. 196). Aparecen dos disposiciones distintas: una retícula de 14 x 14 mallas con puntos de suspensión cada 7 nudos a lo largo de la retícula (fig. 196.1-4.10-11), y otra retícula de 7 x 7 mallas con puntos de suspensión en los nudos de intersección de la retícula (fig. 196.5-8).



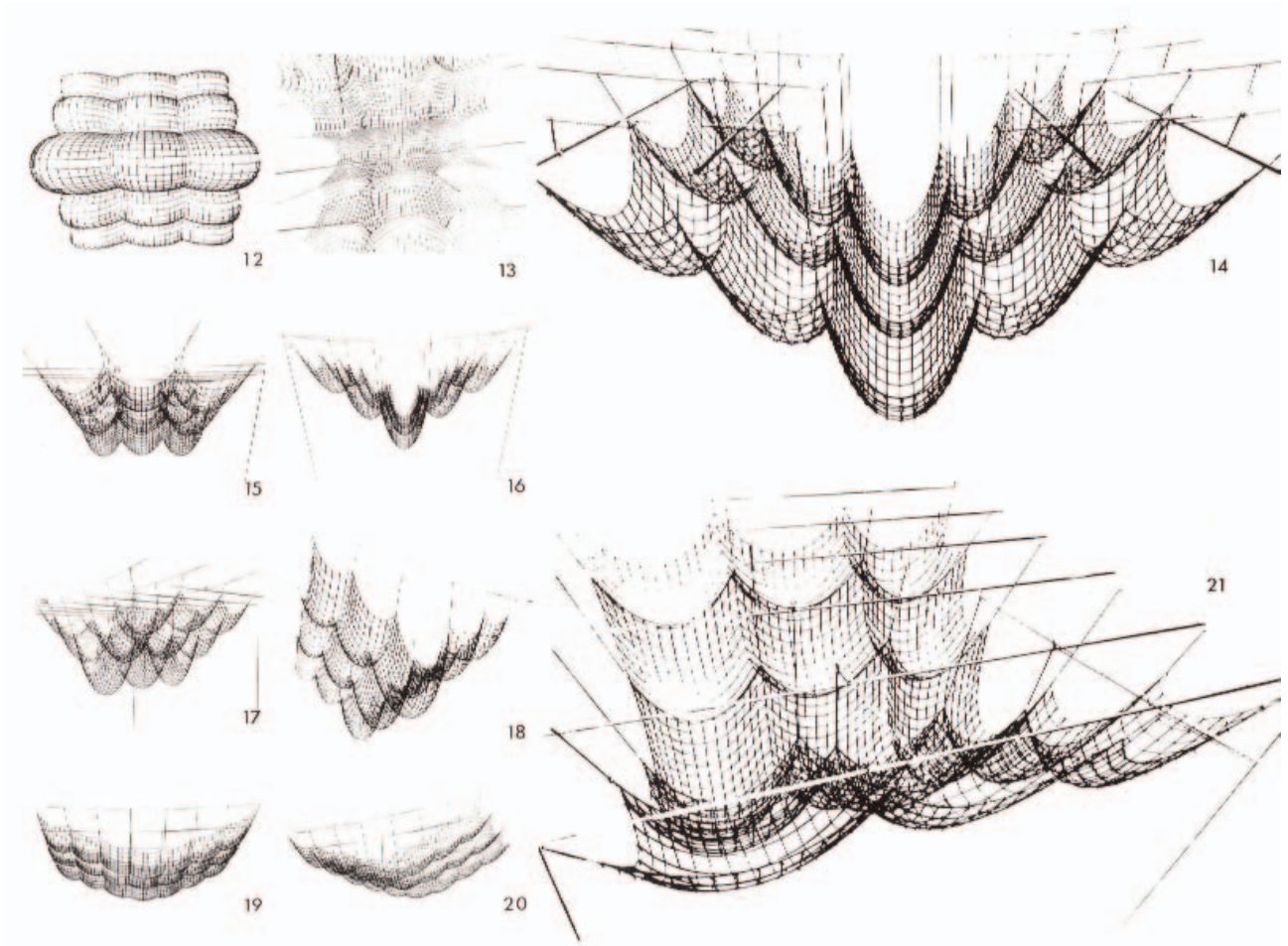
195



También aparece en la clasificación una variación de la disposición anterior con la misma red catenaria de 42 x 58 mallas simétrica respecto de dos ejes perpendiculares, pero situando los puntos de suspensión en distintos planos horizontales (fig. 197).

Si tomamos como forma de partida una red rectangular de mallas cuadradas colgada de las esquinas con los puntos de suspensión contenidos en un plano horizontal, se puede formar un número casi ilimitado de formas suspendidas diferentes utilizando nudos colgados adicionales, cuyo número y disposición se puede variar a discreción.

197



En la clasificación se sistematizan algunas de estas variaciones y combinaciones mediante una matriz (fig. 198) en la que se han considerado sólo cinco posiciones para los puntos de suspensión adicionales: en el centro y en los tercios de las líneas de borde de la red, en los cuartos de los ejes de simetría o de las diagonales y en la intersección de los ejes de simetría. En la fila 1 de la matriz aparecen algunas combinaciones posibles de posiciones de puntos de suspensión en el borde de la red, y en la columna A en el interior de la red. La intersección de los ejes de simetría como punto de suspensión aparece sólo en las variantes de la columna A, y se representa con el signo "o". No obstante, todas las variaciones de la matriz son posibles con o sin este punto de suspensión. La matriz tampoco considera otras variaciones posibles de las formas suspendidas que se producirían al ir modificando la altura de los puntos de suspensión adicionales. En cualquier caso esta matriz es un ejemplo de investigación sobre la forma a partir de un elemento inicial – una red colgada – en el que, aparte de los puntos de suspensión, se pueden utilizar como variables otros elementos primarios o secundarios generadores de la forma.

Fig. 197. Red con puntos de suspensión interiores dispuestos en distintos planos horizontales y en retícula. Fuente: IL 10 pág. 103

Fig. 198. Matriz combinatoria de la disposición de puntos de suspensión adicionales a las esquinas. Fuente: IL 10 pág. 104

(páginas siguientes)

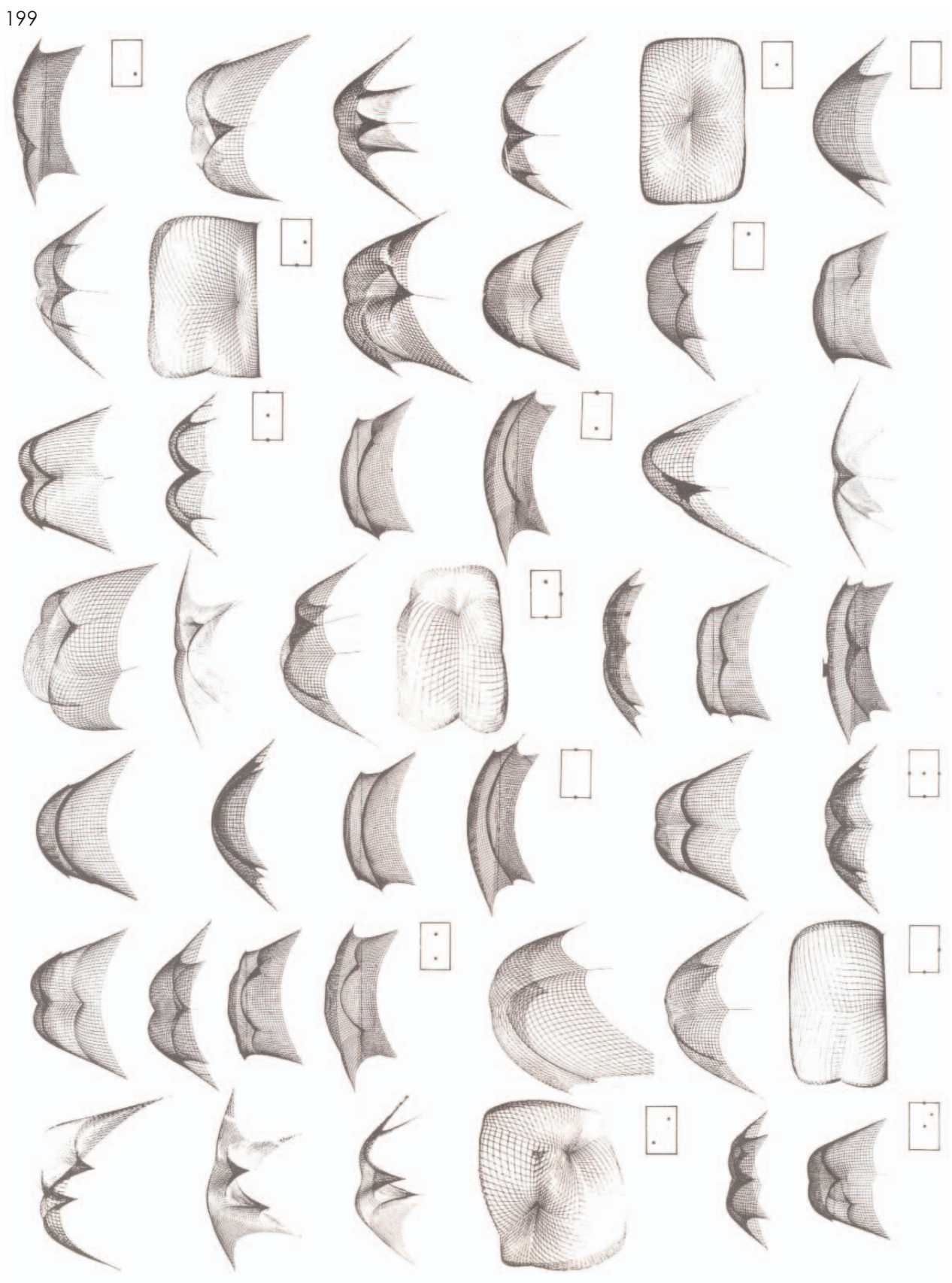
Fig. 199. Ejemplos de formas suspendidas producidas a partir de la matriz combinatoria de la fig. 198. Fuente: IL 10 pág. 105

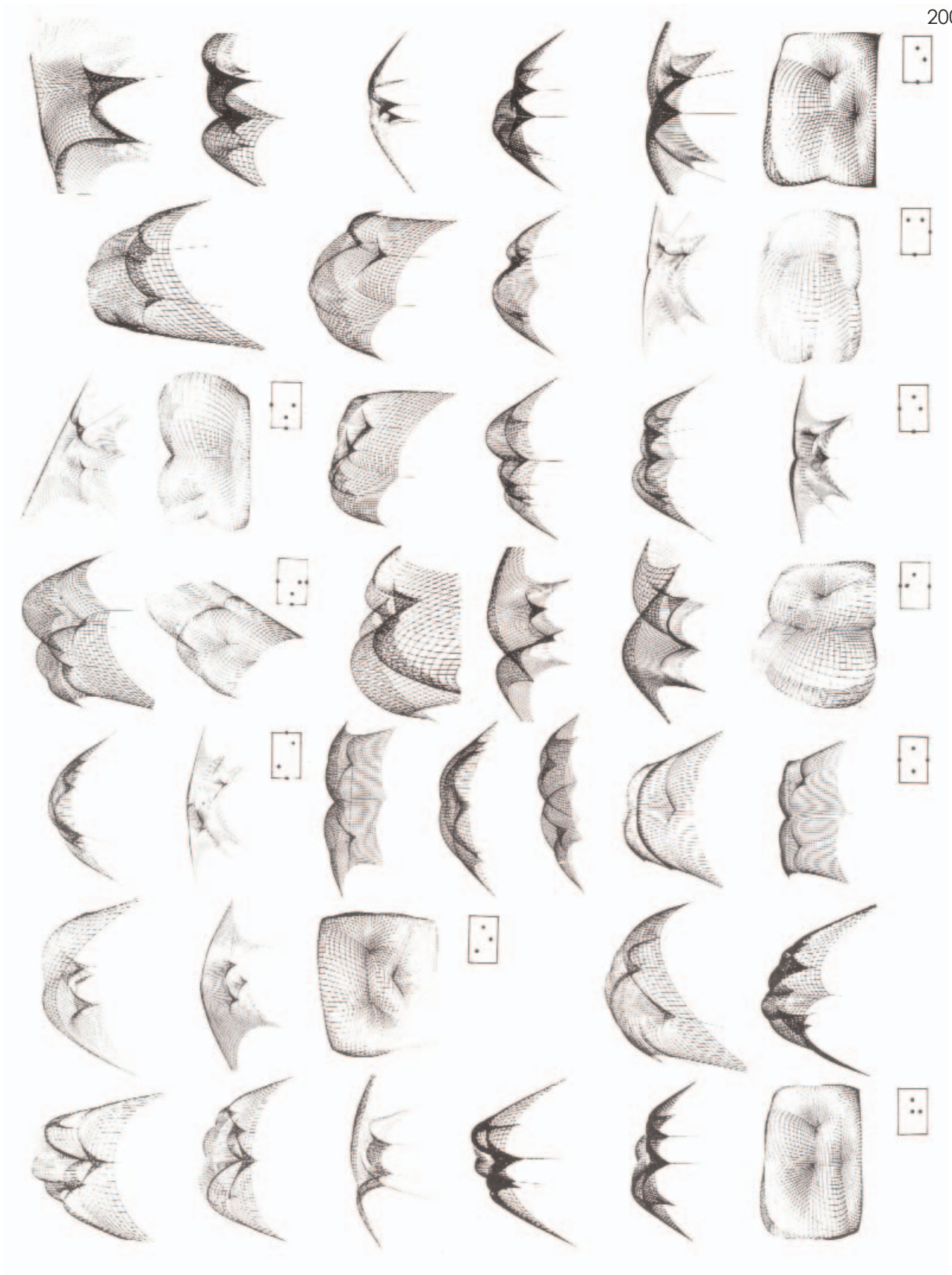
Fig. 200. Ejemplos de formas suspendidas producidas a partir de la matriz combinatoria de la fig. 198. Fuente: IL 10 pág. 106

Fig. 201. Ejemplos de formas suspendidas producidas a partir de la matriz combinatoria de la fig. 198. Fuente: IL 10 pág. 107

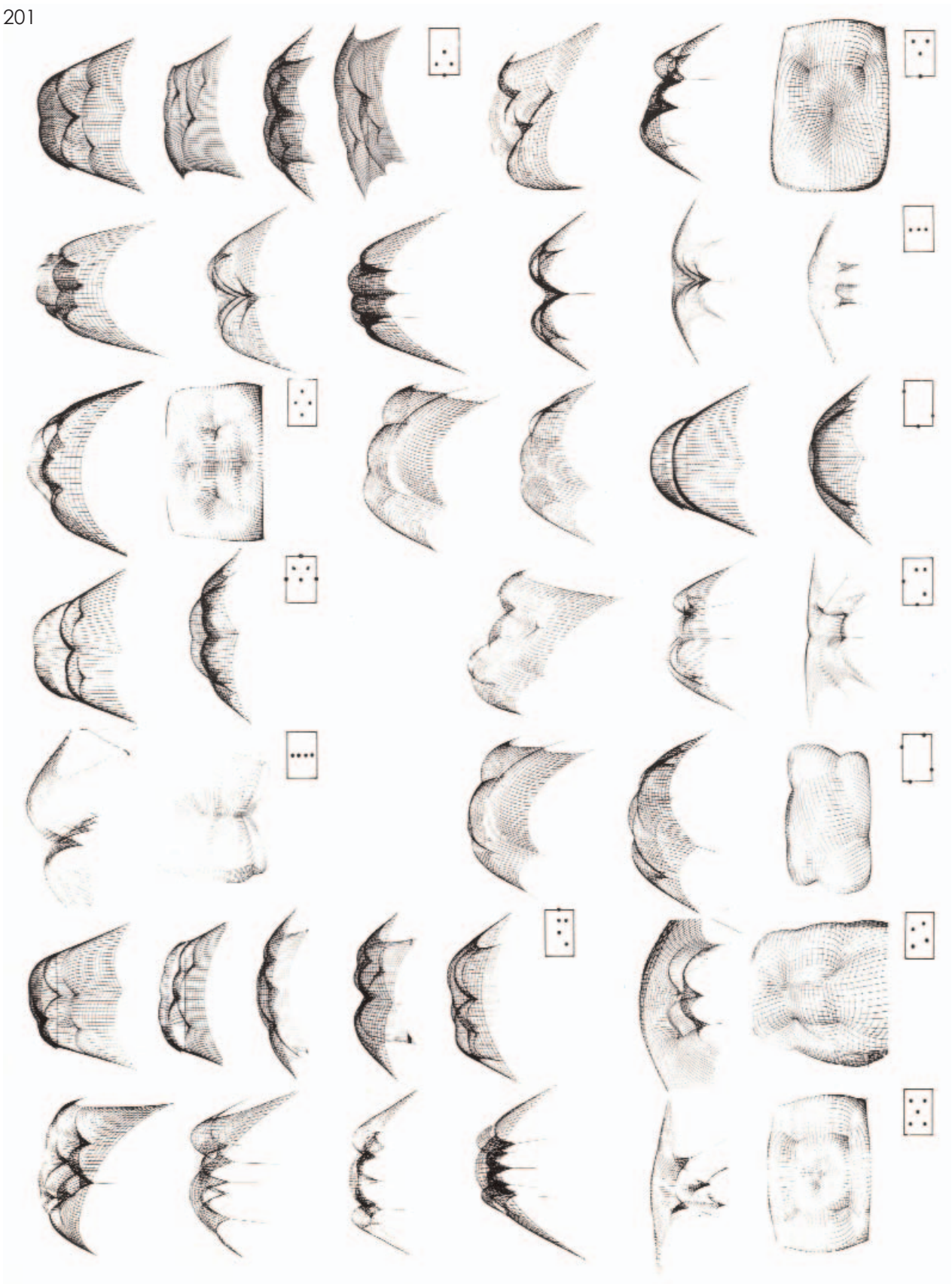
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													

199





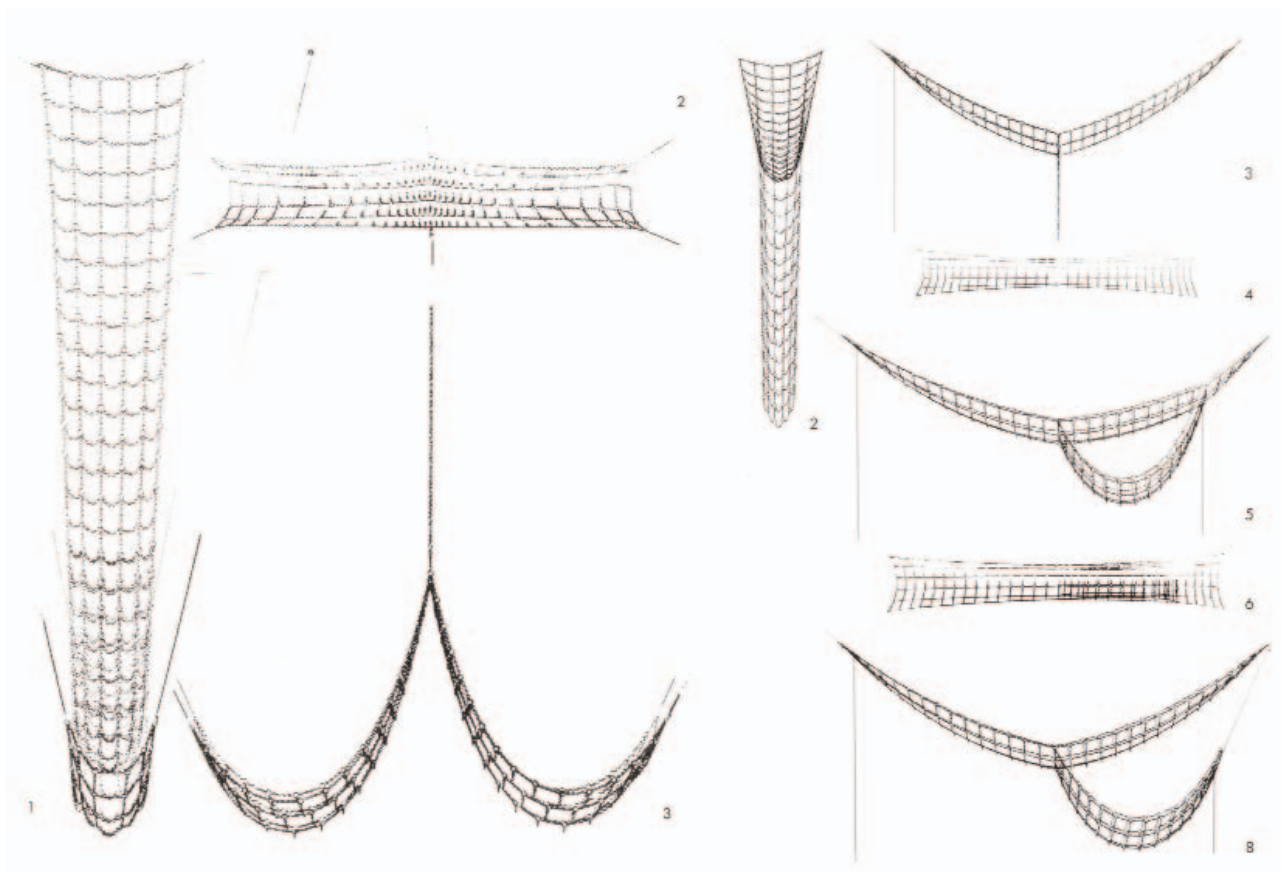
201



VI.2.5.9. Redes compuestas.

La clasificación presenta cuatro variaciones de redes colgadas formadas por tres redes parciales iguales, de 5 x 15 mallas, en las que concurre uno de los bordes pequeños de cada red parcial en una misma línea de borde de la red. La red está colgada de las seis esquinas que quedan libres, y las variaciones se forman modificando la posición de los puntos de suspensión.

Fig. 202. Redes compuestas.
Fuente: IL 10 pág. 111 y 113



202

VI.2.5.10. Redes colgadas con solapes.

La clasificación distingue, dentro de esta categoría, dos tipos: redes con borde rígido, cerrado y curvado espacialmente (fig. 203.1-11), y redes con borde flexible (fig. 203.12-16). El borde rígido del primer tipo está formado por un alambre de acero previamente curvado a discreción, y la red está linealmente colgada del borde. En el segundo tipo el desarrollo ortogonal de la red es rectangular (42 x 58 mallas) y la red cuelga de varios puntos.

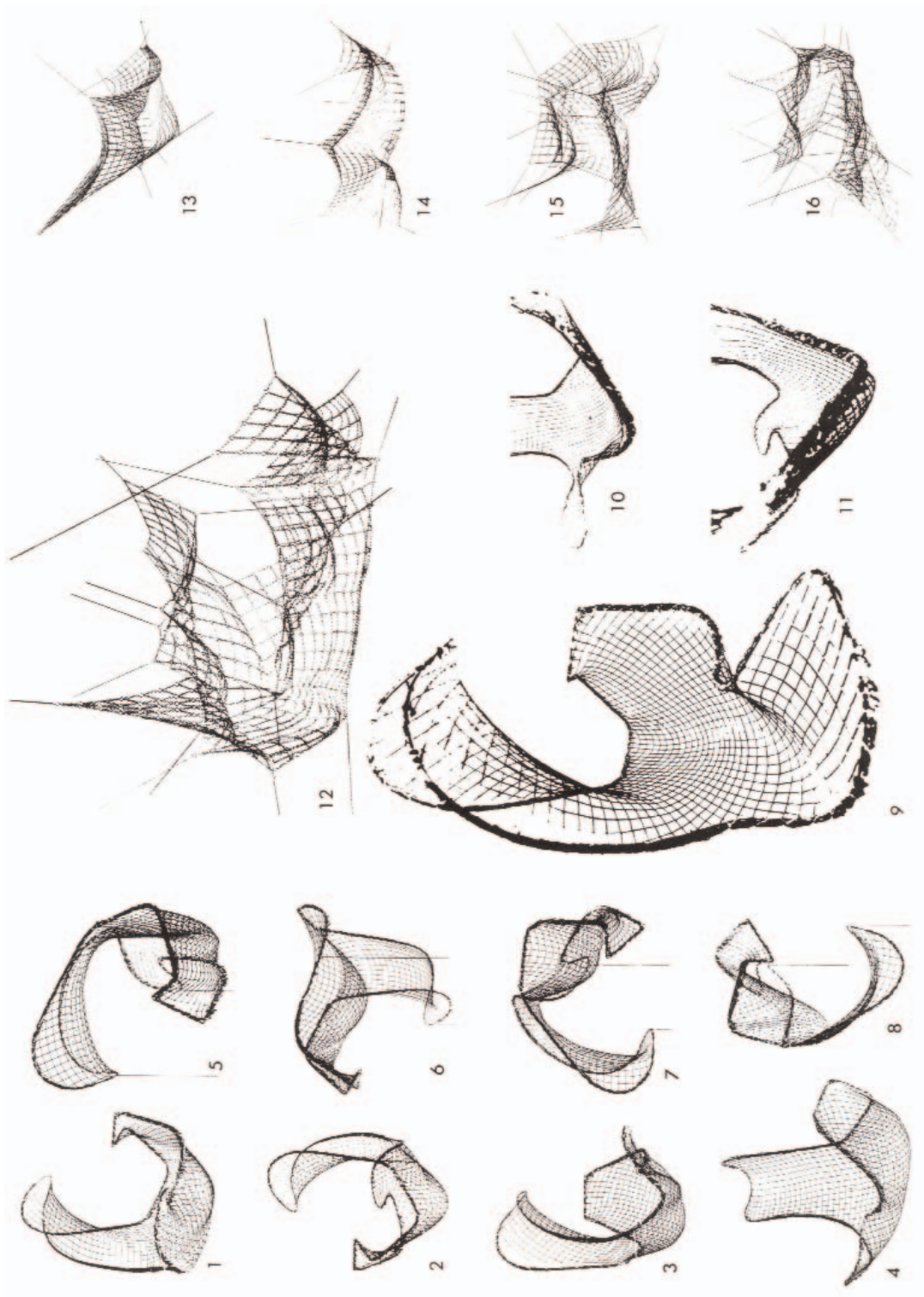
Dentro del primer tipo se diferencian dos posibilidades: en la primera (fig. 203.1-4, 9) el borde de la red tiene una posición espacial fija y el patrón de la red se va elaborando para que no aparezcan descuelgues localizados. En la segunda (fig. 203.5-8) se va modificando la posición espacial del borde rígido, permaneciendo inalterada la forma de la red en su desarrollo ortogonal. En esta segunda posibilidad aparecen siempre descuelgues localizados. Probablemente habría para cada posición espacial del borde rígido una forma determinada de desarrollo ortogonal de la red con la que no aparecería ningún descuelgue localizado. Esta forma del patrón de la red sólo se puede obtener mediante un proceso de optimización de la red colgada en la maqueta. En ambos casos todas las formas suspendidas tienen áreas de curvatura sinclástica y áreas de curvatura anticlástica.

Para reducir los descuelgues localizados en las redes con borde flexible (fig. 203.12-16) no sólo se pueden utilizar nudos como puntos de suspensión, sino que además se tienen que tensar parcialmente. Las líneas de red que atraviesan nudos colgados o tensados producen aristas autogeneradas. A pesar de los importan-

Fig. 203. Redes colgadas con solapes. Fuente: IL 10 pág. 115

tes esfuerzos de tensión aplicados en algunos puntos, no dejan de aparecer en algunas zonas de la forma suspendida descuelgues localizados.

203



VI.2.5.11. Redes extendidas por barras comprimidas.

Al introducir en la red barras comprimidas surgen nuevas posibilidades para generar una multitud de formas puntualmente suspendidas adicionales. Una barra comprimida es un elemento constructivo rígido, extraño a la red, que está unido en cada extremo a un nudo de la red mediante una articulación. La barra al extender la red genera una fuerza de compresión que actúa a lo largo de la recta que une los nudos vinculados a los extremos de la barra. La magnitud de esta fuerza depende de la distancia entre los extremos de la barra con relación al tamaño total de la red. La forma de la barra es arbitraria: puede ser recta o curvada. En la bóveda de celosía la barra siempre se convierte en un elemento estructural rectilíneo y traccionado.

En las maquetas colgadas que aparecen en esta categoría de la clasificación las barras están unidas exclusivamente a nudos situados en líneas de borde de las redes. Hay varios grupos de maquetas de redes cuadradas de 10 x 10 mallas. Un primer grupo en el que las redes están colgadas del punto de intersección de los ejes de simetría, con barras diagonales de igual longitud dispuestas entre las esquinas de la red (fig. 204). Las líneas de la red que pasan por el punto de suspensión producen aristas autogeneradas, así como quiebras en los bordes de la red. Las barras pueden tener – una o las dos – una rótula en el medio, que deberá estar sujeta al punto de suspensión mediante una tercera barra vertical (fig. 204.6-14).

Hay un segundo grupo en el que las redes están colgadas de dos esquinas diagonalmente opuestas, estando las otras dos unidas por una

barra diagonal (fig. 205.1-4). Se introduce una variación añadiendo dos barras adicionales paralelas a la barra diagonal dispuestas entre nudos opuestos situados en el punto medio de los bordes de la red (fig. 205.5-8).

Un tercer grupo lo formarían estas redes cuadradas de 10 x 10 mallas colgadas de tres esquinas (fig. 205.9-12) a las que se les añade una barra diagonal unida a la cuarta esquina (fig. 205.13-16). Por último tendríamos otro grupo formado por redes colgadas de cuatro esquinas con sendas barras dispuestas entre los nudos medios de bordes opuestos (fig. 206.17-19), o bien redes colgadas de los puntos medios de los bordes (fig. 206.20-22) extendidas por sendas barras diagonales dispuestas entre las esquinas (fig. 206.23-25).

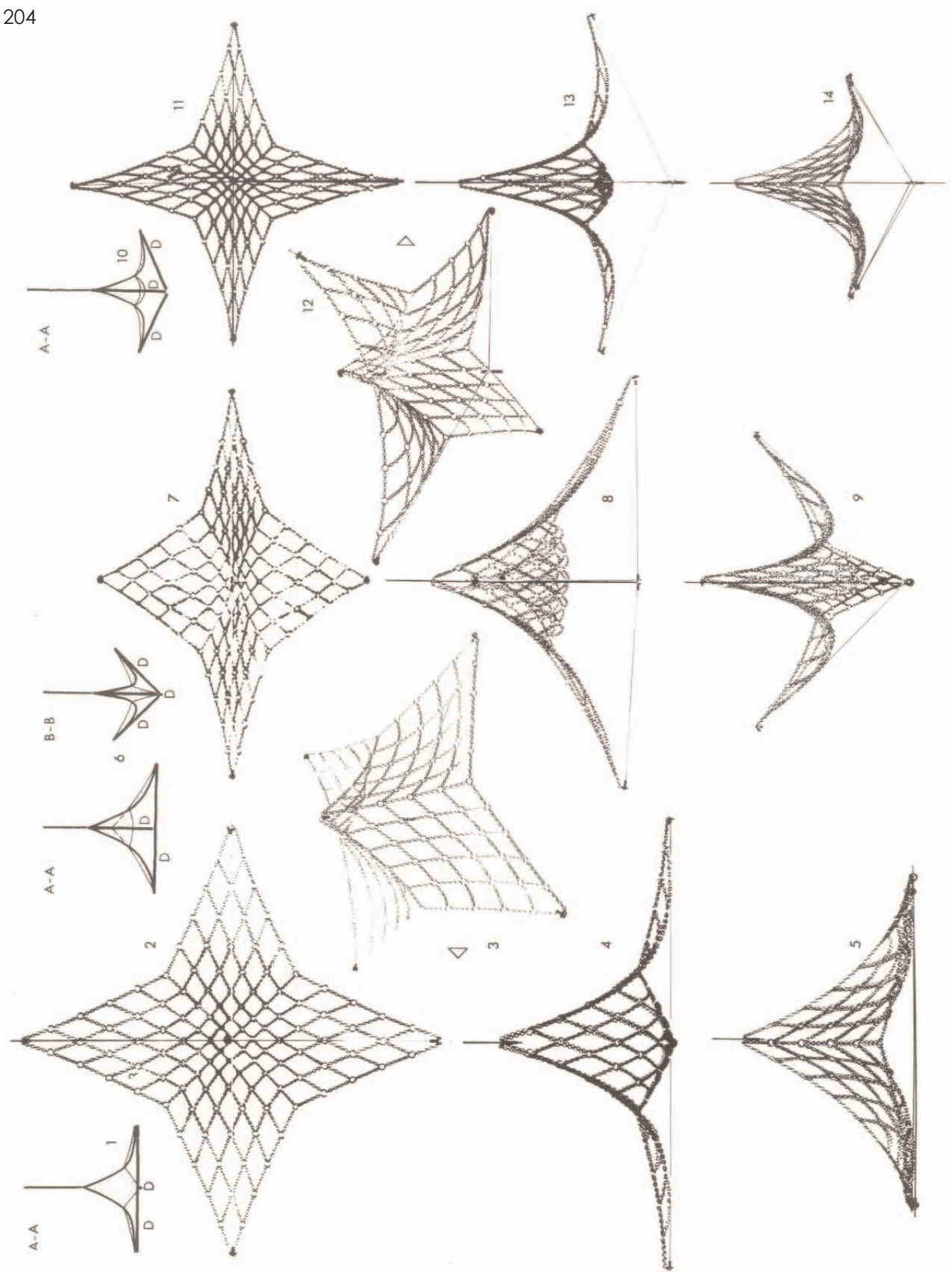
(páginas siguientes)

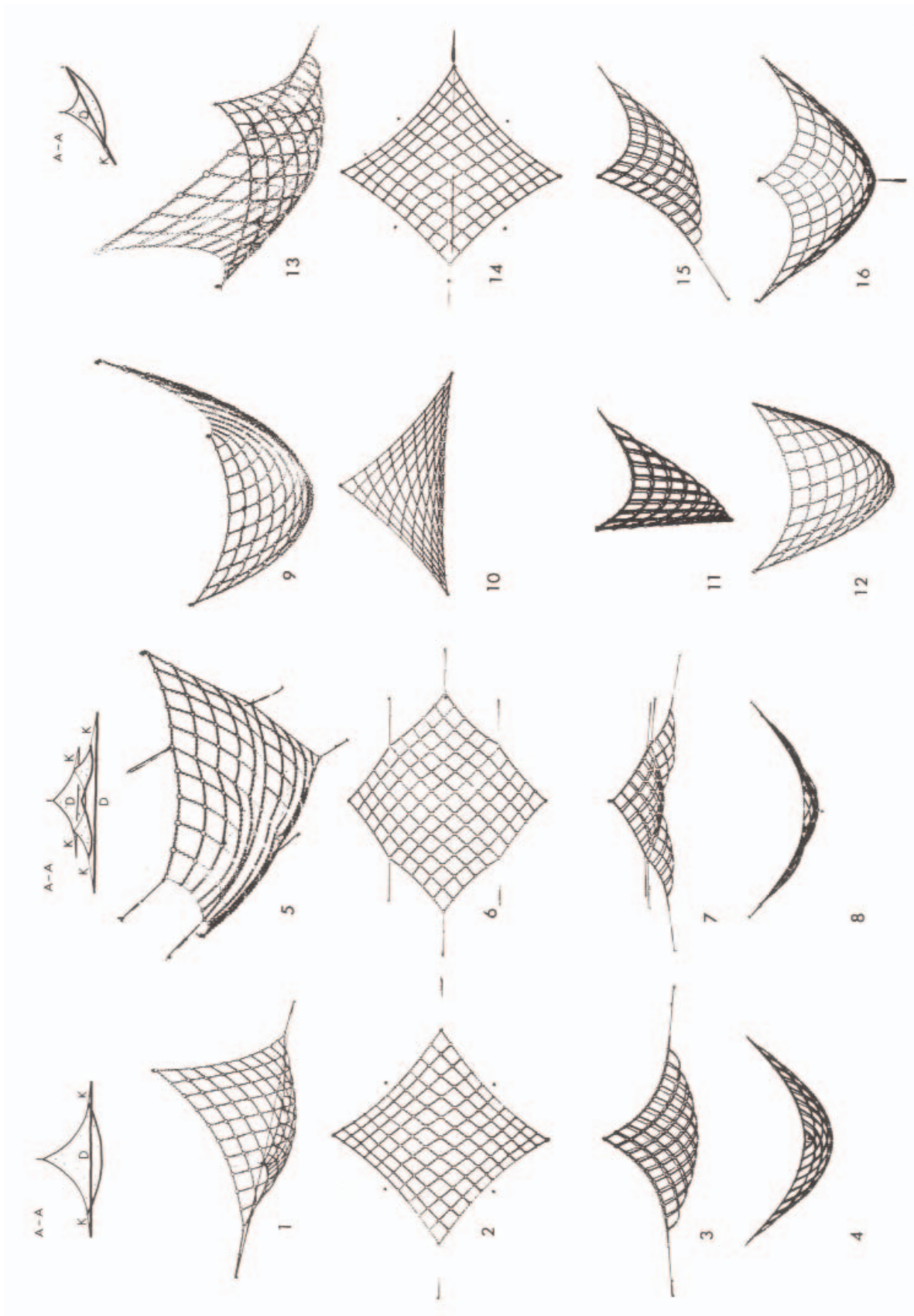
Fig. 204. Redes colgadas del nudo central extendidas por barras diagonales. Fuente: IL 10 pág. 117

Fig. 205. Redes colgadas de dos y tres esquinas extendidas por barras. Fuente: IL 10 pág. 118

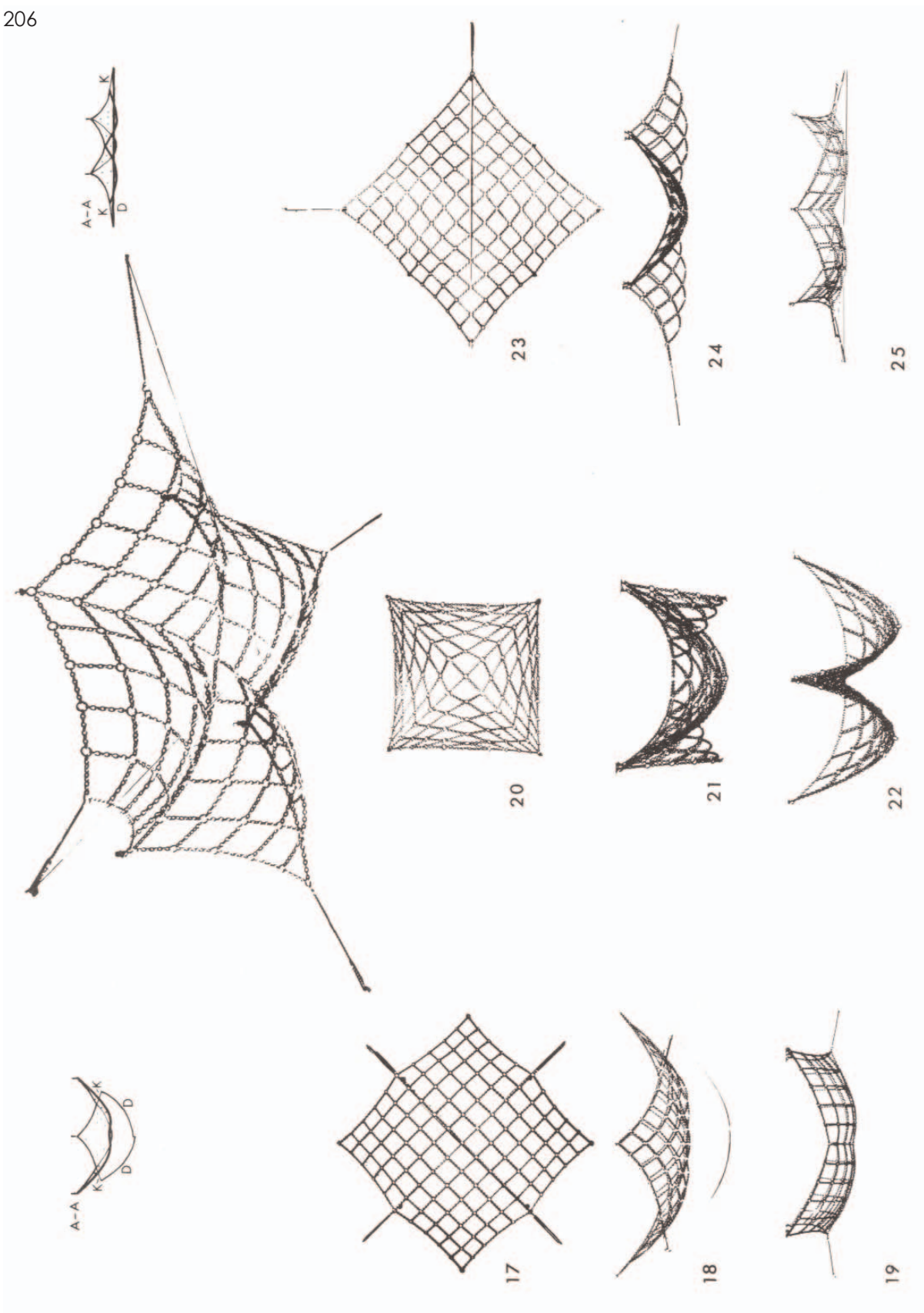
Fig. 206. Redes colgadas de cuatro nudos extendidas por barras. Fuente: IL 10 pág. 119

204





206



VI.2.5.12. La catenaria erguida en la red colgada.

En las redes colgadas de esta categoría de la clasificación se forma una catenaria erguida al tirar hacia arriba una línea de la red situada en el plano de simetría vertical mediante una distribución uniforme de cargas puntuales próximas entre sí, generadas por contrapesos o muelles (fig. 207). Las variaciones de la forma suspendida se producen modificando la altura de los puntos de suspensión en las esquinas. Cuando se invierte la maqueta, la catenaria erguida produce en la bóveda de celosía un valle recorrido por un elemento constructivo traccionado, como por ejemplo un cable.

Fig. 207. Redes colgadas con catenaria erguida. Fuente: IL 10 pág. 125

207

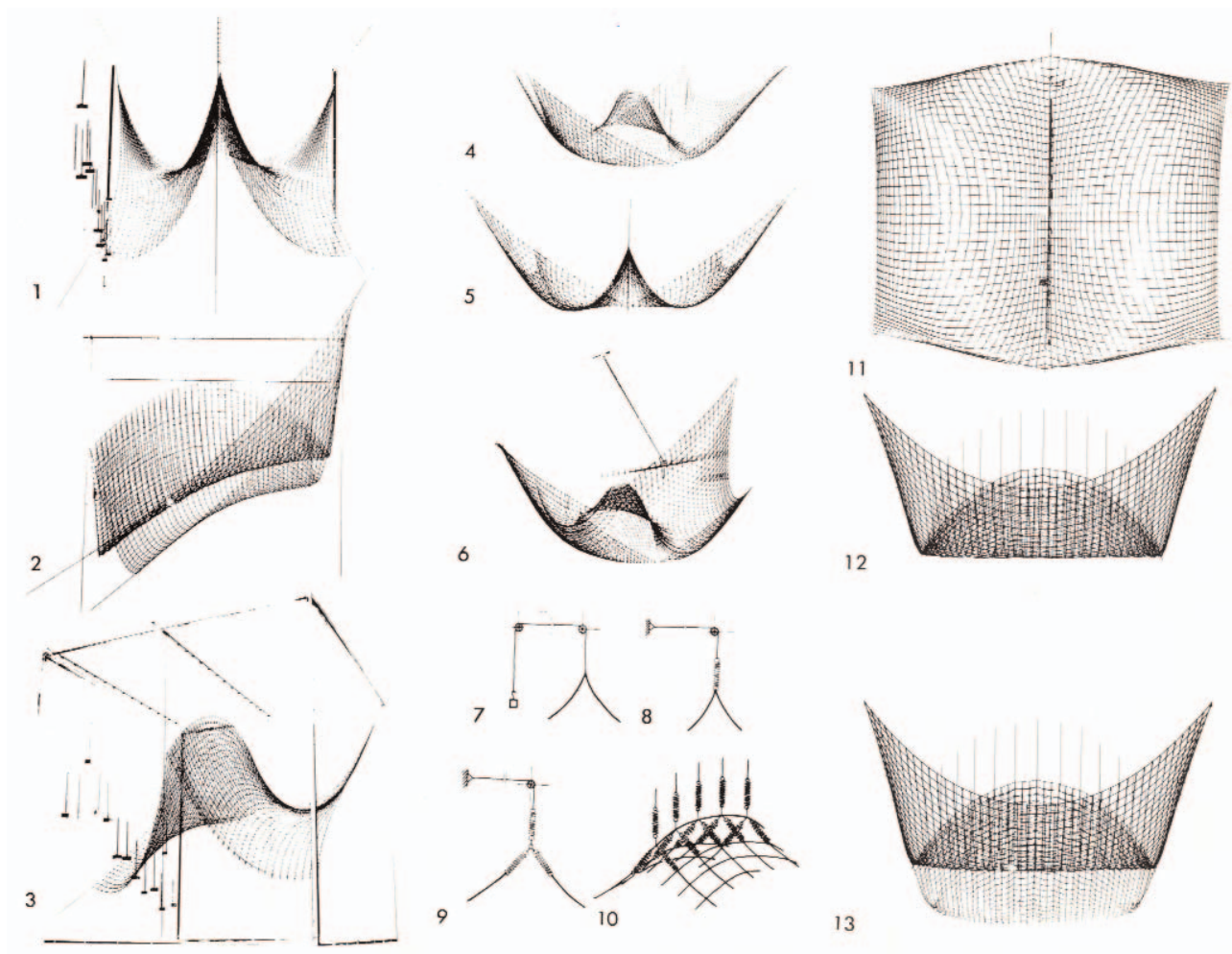


Fig. 208. Formas de ojos en bóvedas de celosía. Fuente: IL 10 pág. 126

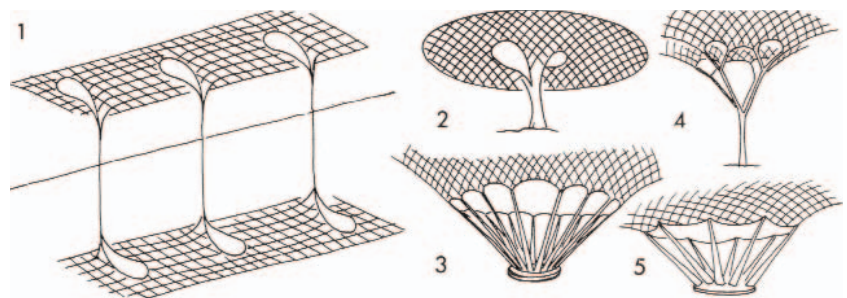
Fig. 209. redes colgadas con un ojo cuyo borde está suspendido por uno, dos o cuatro puntos. Fuente: IL 10 pág. 129

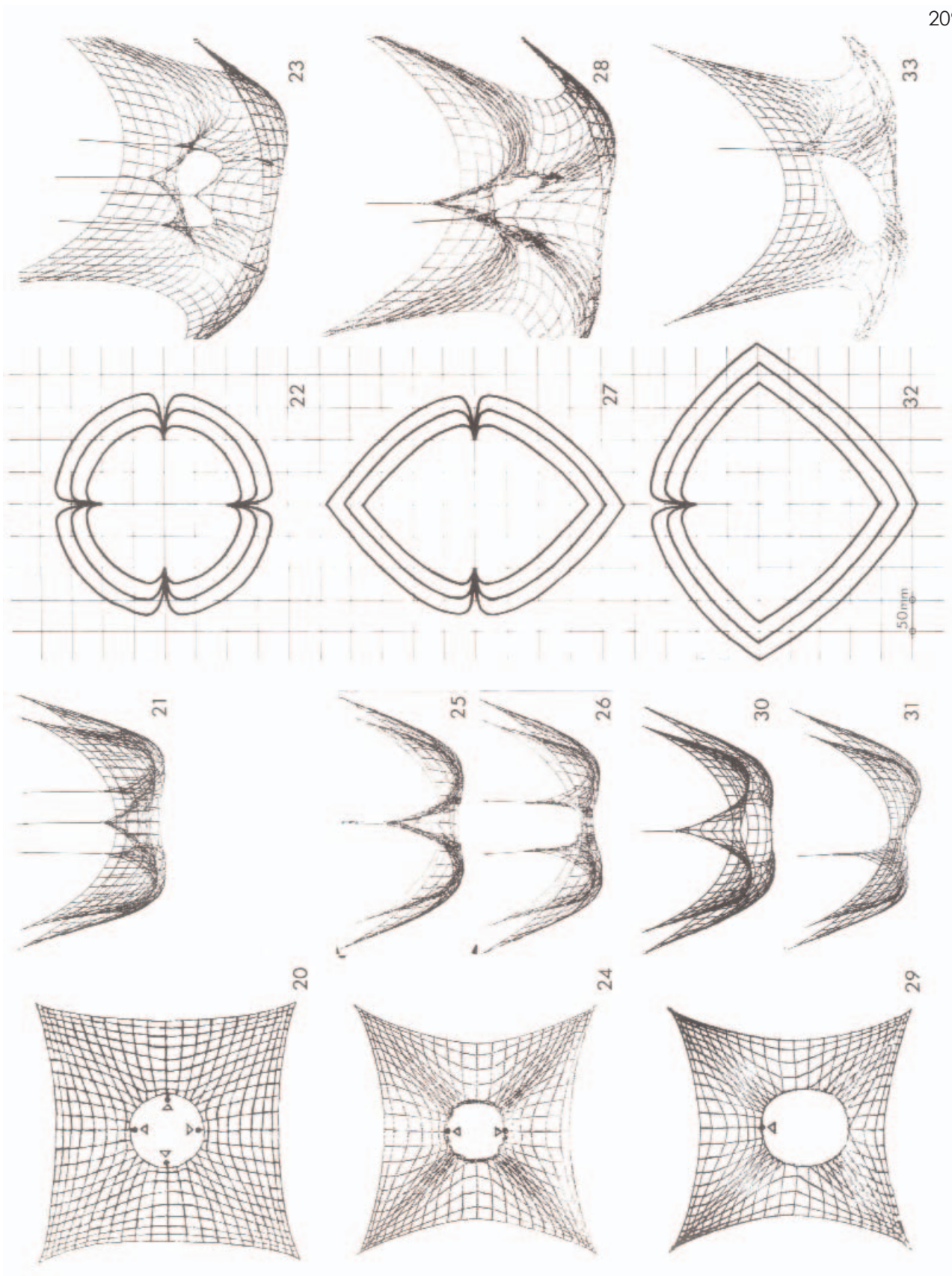
VI.2.5.13. El ojo en la red.

Un ojo es un tipo especial de suspensión en el interior de una red colgada. A diferencia de lo que sucede con los puntos de suspensión interiores (ver VI.2.5.8, página 333), cuando aparece un ojo en la red colgada no se produce ninguna arista autogenerada. Un ojo es en cierta medida una "ampliación" de una suspensión puntual: una arista, mediante la cual las fuerzas procedentes del interior de la red son dirigidas hacia el punto de suspensión, se divide y se expande para formar la abertura del ojo. El borde de un ojo se puede colgar una o varias veces: si está colgado por más de tres puntos se trata de un rosetón. En la maqueta colgante el ojo tiene siempre un borde flexible.

Un ojo no es una forma autogenerada. El patrón o desarrollo ortogonal de una red colgada en la zona de un ojo tiene que venir determinado por un proceso empírico e iterativo en la propia maqueta colgante, a partir de una abertura inicialmente circular. En la clasificación aparecen formas suspendidas con un ojo cuyo borde está suspendido por uno (fig. 209.29-33), dos (fig. 209.24-28) o cuatro puntos (fig. 209.20-23). La trayectoria del borde del ojo es la que se ha obtenido de forma experimental sobre la maqueta para evitar la aparición de aristas.

208





VI.2.6. Posibilidades de las bóvedas de celosía para la arquitectura.

Dos aspectos destaca la investigación de Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras acerca de las posibilidades de las bóvedas de celosía para la arquitectura¹⁴⁵. Por un lado la casi ilimitada variedad de formas que se pueden realizar con estas estructuras. Por otro, el hecho de que no se trata de una superficie de una cáscara cerrada, sino de una celosía simple de curvatura espacial compuesta por barras. Estos dos aspectos se consideran de fundamental importancia. En ellos queda globalmente caracterizada la estructura de bóvedas de celosía.

Se trata de un paso más en la evolución de los tipos estructurales siguiendo el deseo del hombre, y uno de los motivos básicos de la historia de la arquitectura, de cubrir grandes espacios sin apoyos intermedios y con el mínimo empleo de material, que llevó de las pesadas bóvedas de cañón de los romanos a las delgadas cáscaras de hormigón armado y las afiligranadas estructuras espaciales del siglo XX. Las posibilidades formales de las cáscaras de hormigón son limitadas. El elevado coste del andamiaje y el encofrado propiciaba que las formas preferidas fueran superficies regladas como cilindros, conoides o paraboloides hiperbólicos, geometrías relativamente más sencillas de encofrar siguiendo las generatrices rectilíneas.

¹⁴⁵ Véase A.A.V.V.: *Gitterschalen / Grid shells*. Institut für leichte Flächentragwerke. Stuttgart, 1974. Pág. 250.

Las bóvedas de celosía surgieron dentro de un proceso de búsqueda de métodos de construcción de estructuras laminares más sencillos y económicos¹⁴⁶. Desde antiguo es conocida la importancia, desde el punto de vista estático y constructivo, de la catenaria y de su forma invertida, la línea de presiones, para la determinación de la forma de arcos y bóvedas. Era una consecuencia lógica aplicar el principio de invertir una forma colgada traccionada para generar una forma "erguida" comprimida también a las estructuras laminares de curvatura espacial.

Las formas de las bóvedas de celosía ya no son proyectadas al modo tradicional, sino que son determinadas siguiendo un proceso empírico de búsqueda de la forma: la forma invertida de la red catenaria colgada es la superficie de presiones de la bóveda de celosía. En la forma colgada está en todo momento visible y controlable la forma de la bóveda de celosía, y ésta puede ser optimizada gradualmente en función de los distintos aspectos relevantes para la obra a construir. Las relaciones entre forma y estructura son reconocibles en cierta medida y se rigen según determinadas leyes de generación de la forma, mediante las cuales las formas colgadas alcanzan una posición de equilibrio por sí solas, sin influencias externas, dependiendo del tipo y disposición de la suspensión y del patrón de la red. Estos elementos generadores de la forma, sin embargo, pueden ser elegidos libremente. Hay un número ilimitado de posibilidades de seleccionar, ordenar y combinar éstos en lo relativo a forma, tamaño o trazado.

¹⁴⁶ Véase nota 139.

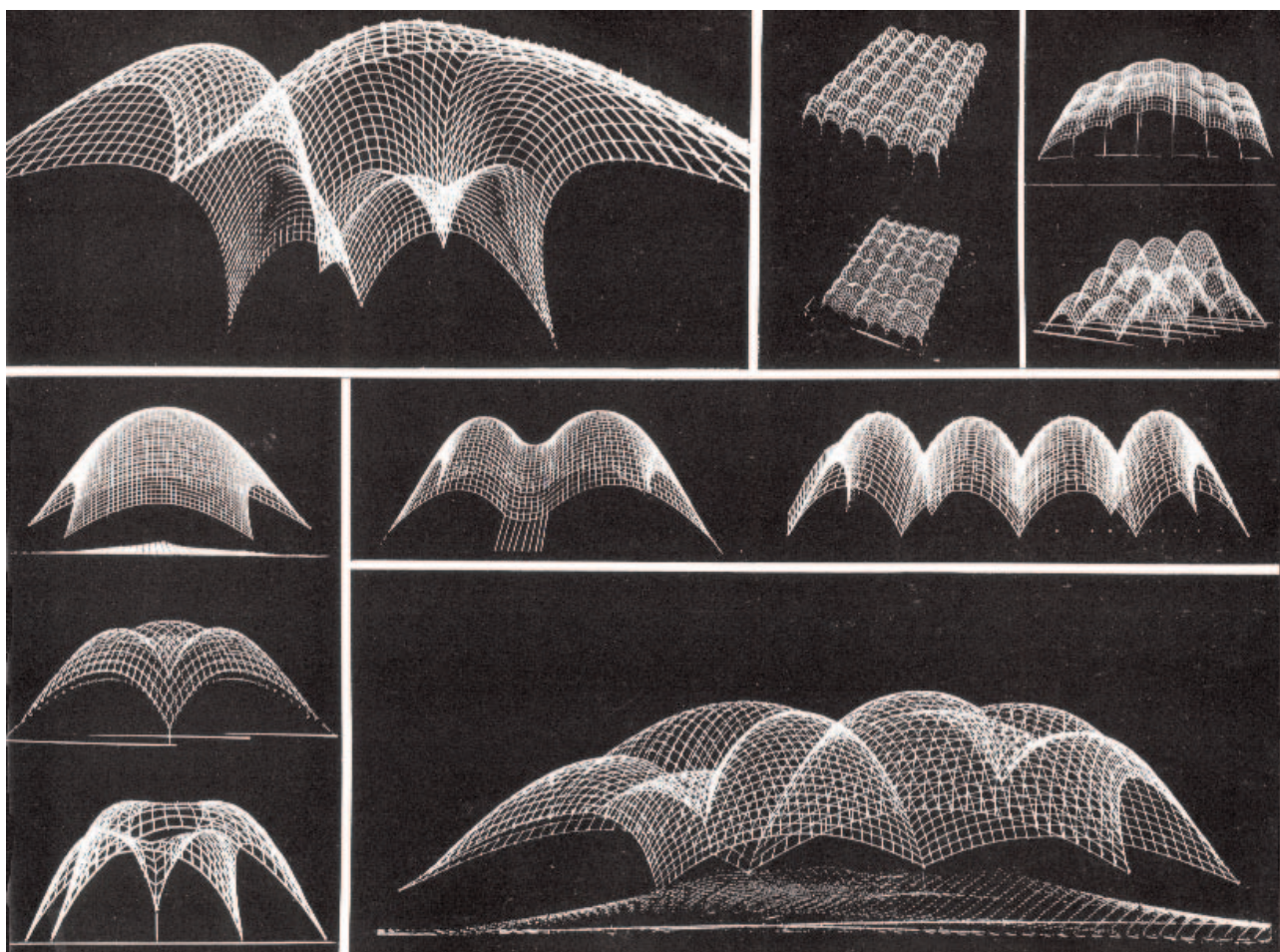
Fig. 210 (página derecha), 211 a 213 (páginas siguientes). Selección de diferentes variaciones y combinaciones del catálogo de formas colgadas invertidas. Fuente: IL 10 pág. 251 y 253 a 255.

De ahí la riqueza formal de las bóvedas de celosía. Estas pueden cubrir cualquier disposición en planta. Pueden llegar hasta el suelo, siguiendo el borde cualquier contorno, o bien pueden apoyarse en cimentaciones, soportes o muros individuales. Se pueden yuxtaponer en horizontal para cubrir grandes superficies, manteniendo o variando formas y tamaños, y cerrando los "ojos" generados entre bordes curvados con pequeñas bóvedas de celosía. También se pueden superponer en vertical, aunque estas formas son mutuamente dependientes y deben ser, por tanto, determinadas en una maqueta colgada común. También se pueden adosar a cuerpos edificados existentes de otros tipos constructivos con el fin de ampliarlos.

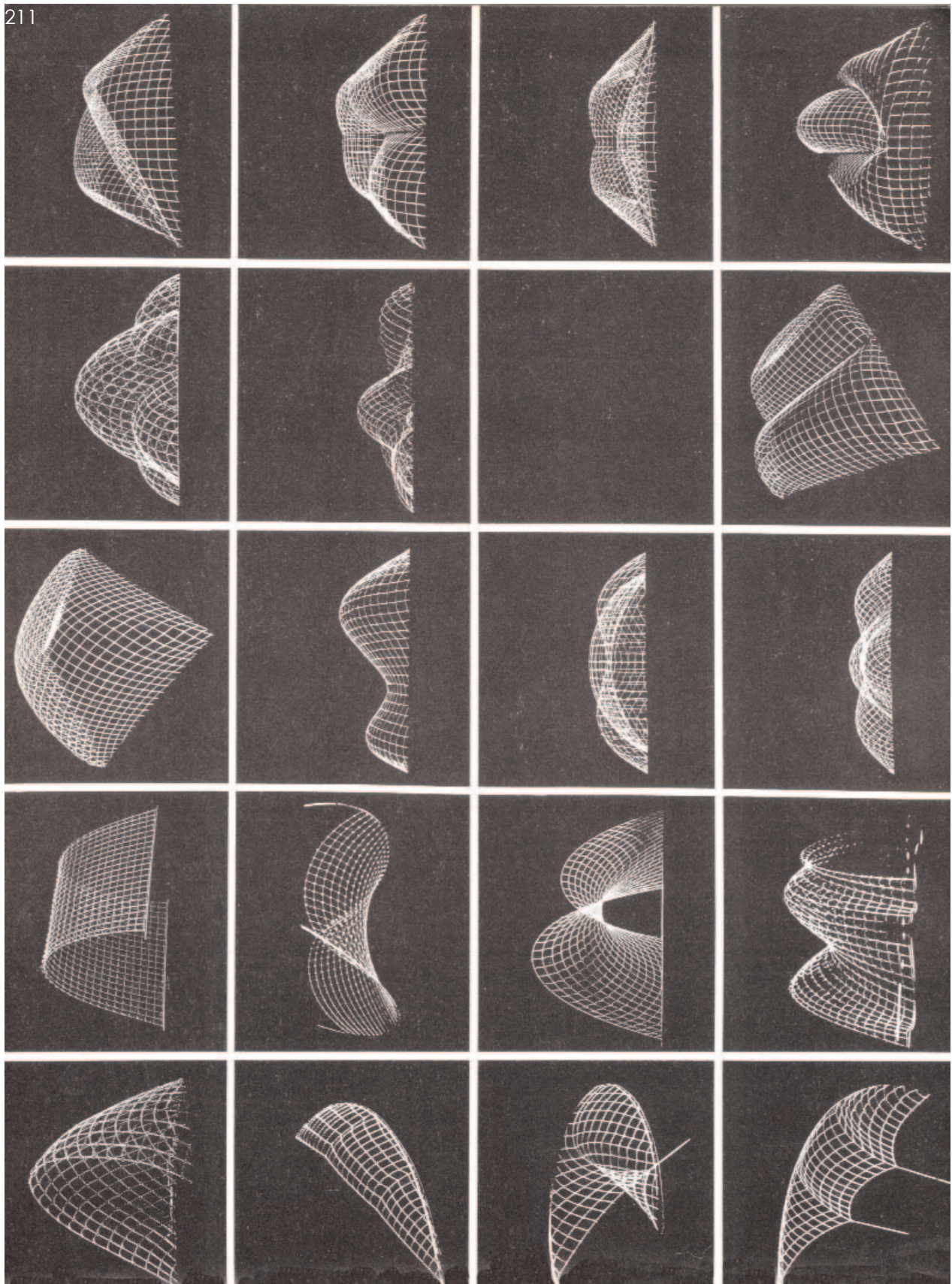
La multiplicidad de formas exteriores encuentra su contrapartida en espacios interiores de muy distintos tipos, cuyo efecto todavía puede quedar más resaltado por una cubrición más o menos traslúcida. Las bóvedas de celosía son adecuadas para todo tipo de finalidad por la que haya que envolver o cubrir espacios pequeños o grandes: como abrigo de emergencia transportable para zonas catastróficas, o igualmente también como gran envolvente de gran luz. Se pueden diseñar como construcciones móviles, de forma que sean desmontables cuando ya no sean necesarias, y puedan ser reutilizadas en otros emplazamientos con nuevos usos. Al ser estructuras ligeras no necesitan cimentaciones pesadas. Se pueden levantar sobre muy distintos tipos de suelos, y son poco sensibles a los asentamientos del terreno y a los movimientos sísmicos, debido a su poca masa y a su elasticidad.

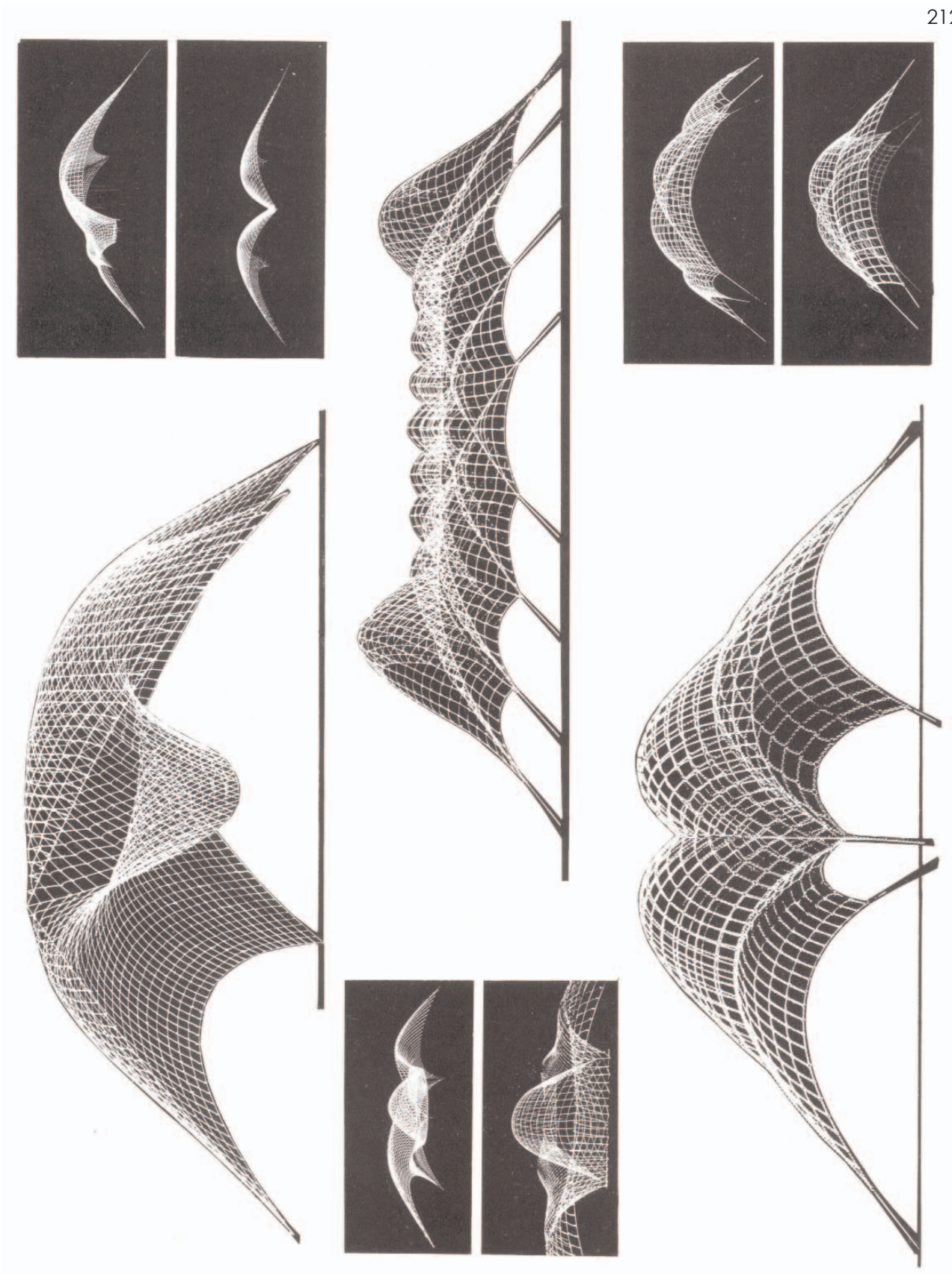
Presentamos a continuación, en las figuras 210, 211, 212 y 213, una selección del catálogo de formas colgadas, invertidas, con variaciones y combinaciones que muestran y sugieren diferentes posibilidades de las bóvedas de celosía para la arquitectura y representan un resumen de las exploraciones experimentales sobre este tipo estructural realizadas por Frei Otto y su equipo.

210

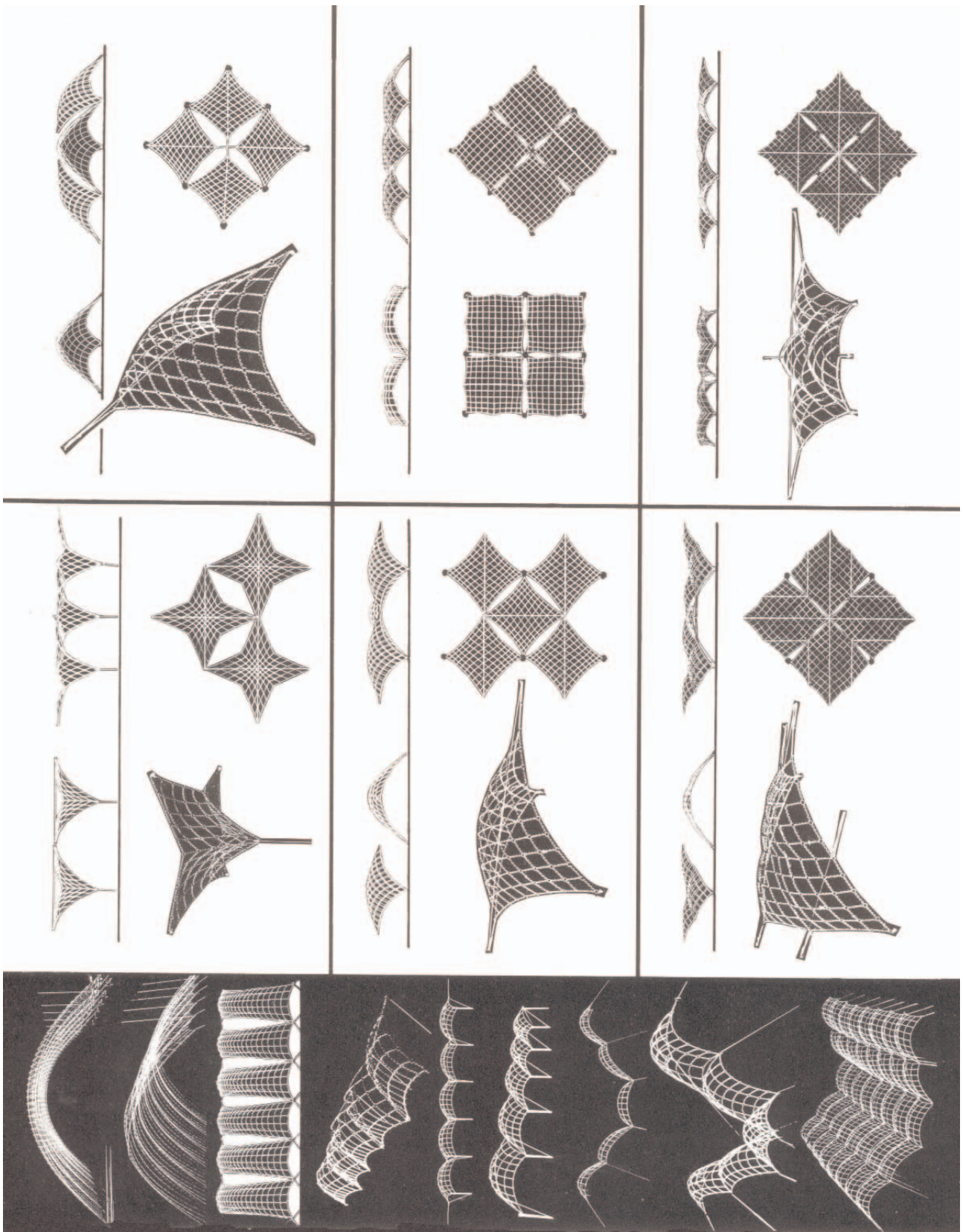


211





213



Frei Otto realizó también una serie de bosquejos o apuntes gráficos con el objetivo de explorar las posibilidades de las bóvedas de celosía para la arquitectura. Son una muestra de esa necesidad de sistematizar y ordenar el mundo de las estructuras señalando nuevos campos todavía inexplorados, planteando un torrente de nuevas posibilidades y propuestas como exploración gráfica de un nuevo tipo estructural: la bóveda de celosía.

Presentamos a continuación en las figuras 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220 y 221 una selección de estos bosquejos gráficos tomados del cuaderno de apuntes de Frei Otto.

Figura 214.1: Métodos prácticos de búsqueda de la forma: maqueta para buscar la forma de una bóveda que envuelva varias construcciones.

Figura 214.2: Varias formas continuas y sus adiciones.

Figura 214.3: Pequeñas bóvedas de celosía dispuestas sobre otras de mayor dimensión.

Figura 215.4: Bóvedas de celosía adosadas a edificaciones existentes:

- a) Jardín de invierno frente a una ventana.
- b) Terraza jardín cubierta.
- c) Calle cubierta.

Figura 215.5: Bóvedas de celosía adosadas a edificaciones existentes:

- a) Protección del viento y la intemperie para una zona de juegos sobre una cubierta plana.
- b) Protección de las olas y la espuma del agua en un muelle.
- c) Vallas protectoras de la nieve.

Figura 215.6: Cáscaras de celosía como cimentación de soportes en suelo muy flojo.

Figura 215.7: Bóvedas de celosía como envolventes de espacios residenciales, soportadas por columnas y colgando de estructuras de cables.

Figura 215.8: Diferentes posibilidades de bóvedas de celosía convertibles.

Figura 216.9: Formas de bóvedas históricas realizadas con bóvedas de celosía.

Figura 216.10: Bóvedas de celosía como torres de refrigeración.

Figura 216.11: Estructuras en esqueleto para edificios residenciales y similares.

Figura 216.12: Bóvedas de celosía como estructuras de puentes.

Figura 217.13: Bóvedas y parrillas de celosía flotantes.

Figura 217.14: Bóvedas de celosía como superestructuras navales.

Figura 217.15: Construcción subacuática.

Figura 217.16 y 17: Depósitos para líquidos y presas de embalse. Cuando están vacíos la forma de la membrana queda fijada por la bóveda de celosía. Cuando están llenos la membrana está traccionada.

Figura 218.18: Bóveda de celosía como estructura de soporte para una estructura neumática.

- a) Montaje de la bóveda de celosía hinchando una membrana.
- b) Sobre la bóveda de celosía se hincha otra membrana, generándose así un cojín neumático soportado por la bóveda de celosía. El espacio inferior no tiene sobrepresión.
- c) Distribución uniforme de sobrecargas de viento y nieve sobre la bóveda de celosía por el cojín neumático.

Figura 218.19: Membranas soportadas neumáticamente utilizadas para cubrir bóvedas de celosía.

- a) Membrana doble estabilizada por subpresión.
- b) Membrana situada en el lado interior. El espacio interior está sujeto a subpresión.
- c) Membrana exterior. El hueco entre membrana y bóveda está sujeto a sobrepresión.

Figura 218.20: Bóvedas de celosía con red de cables colgante por el lado inferior para absorber las fuerzas horizontales.

Figura 218.21: Bóvedas de celosía de doble capa con y sin entramado o celosía interior.

Figura 219.22: Redes traccionadas en bóvedas de celosía.

Figura 219.23: Soportes interiores de bóvedas de celosía direccionando las fuerzas de la celosía a los soportes.

Figura 219.24: Bóvedas de celosía en redes de cables de grandes mallas.

Figura 219.25: Bóvedas de celosía con elementos traccionados.

Figura 220.26: Sistemas aditivos de extensión horizontal.

Figura 221.27: Sistemas aditivos de extensión tridimensional.

Figura 221.28: Cambio de las resultantes en los apoyos en función de la flecha o descuelgue del cable de borde.

Figura 221.29: Relleno de una planta rectangular con bóvedas de celosía de diferentes formas y planta cuadrada.

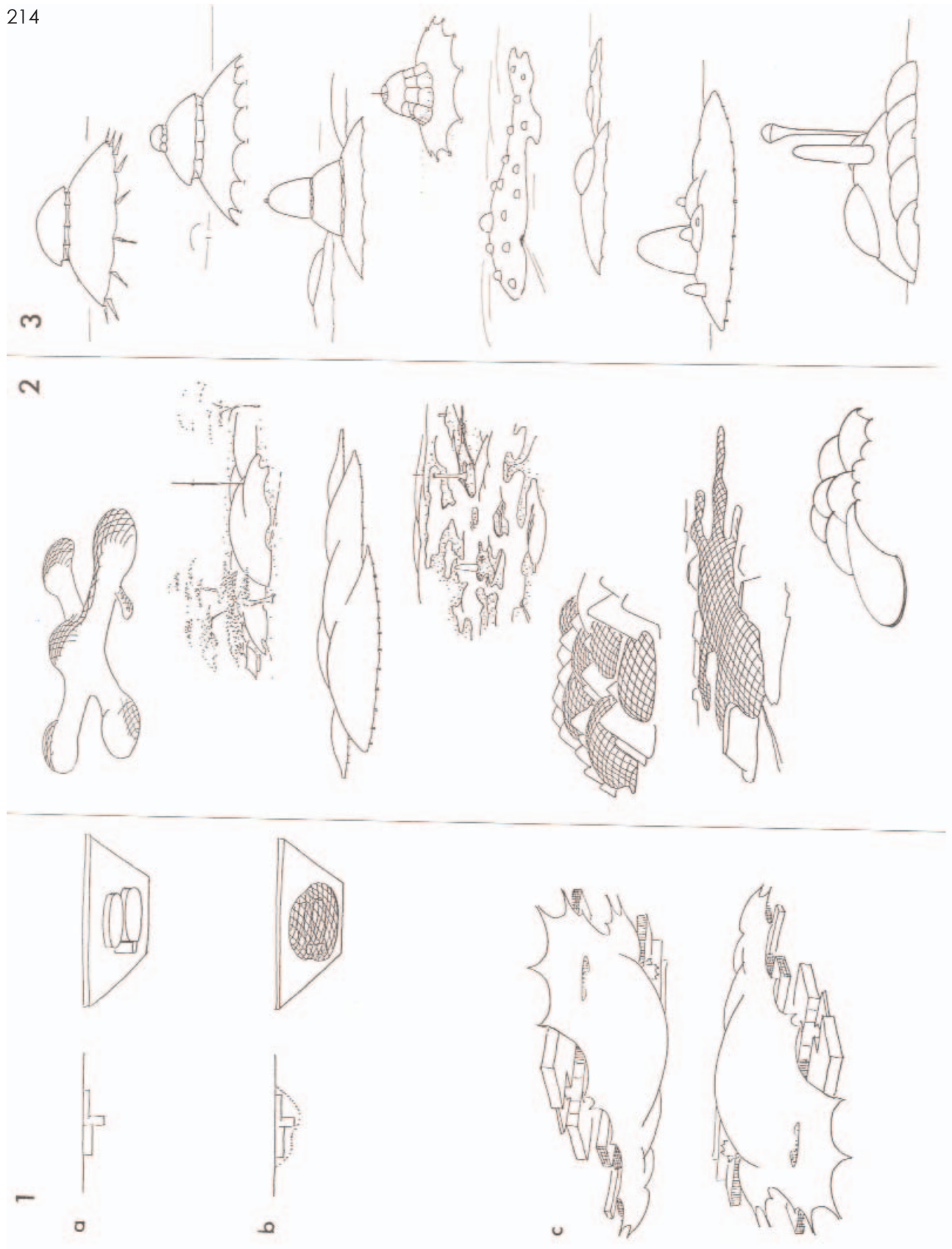
Figura 221.30: Cualquier forma geométrica sin excepción es desarrollable con una red de mallas iguales.

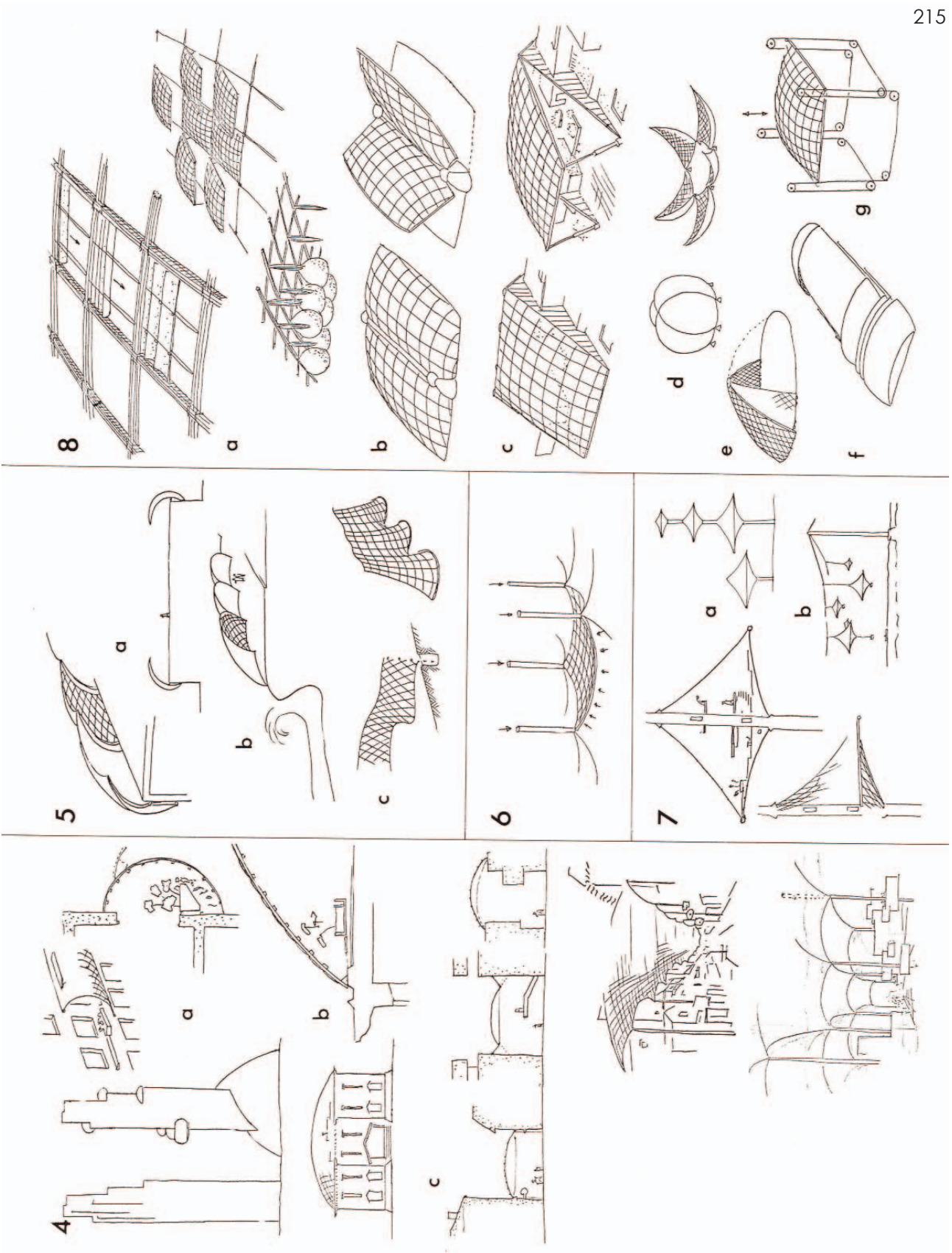
Figura 221.31: Cáscaras de celosía como soportes comprimidos altos y esbeltos para estructuras de redes de cables.

(páginas siguientes)

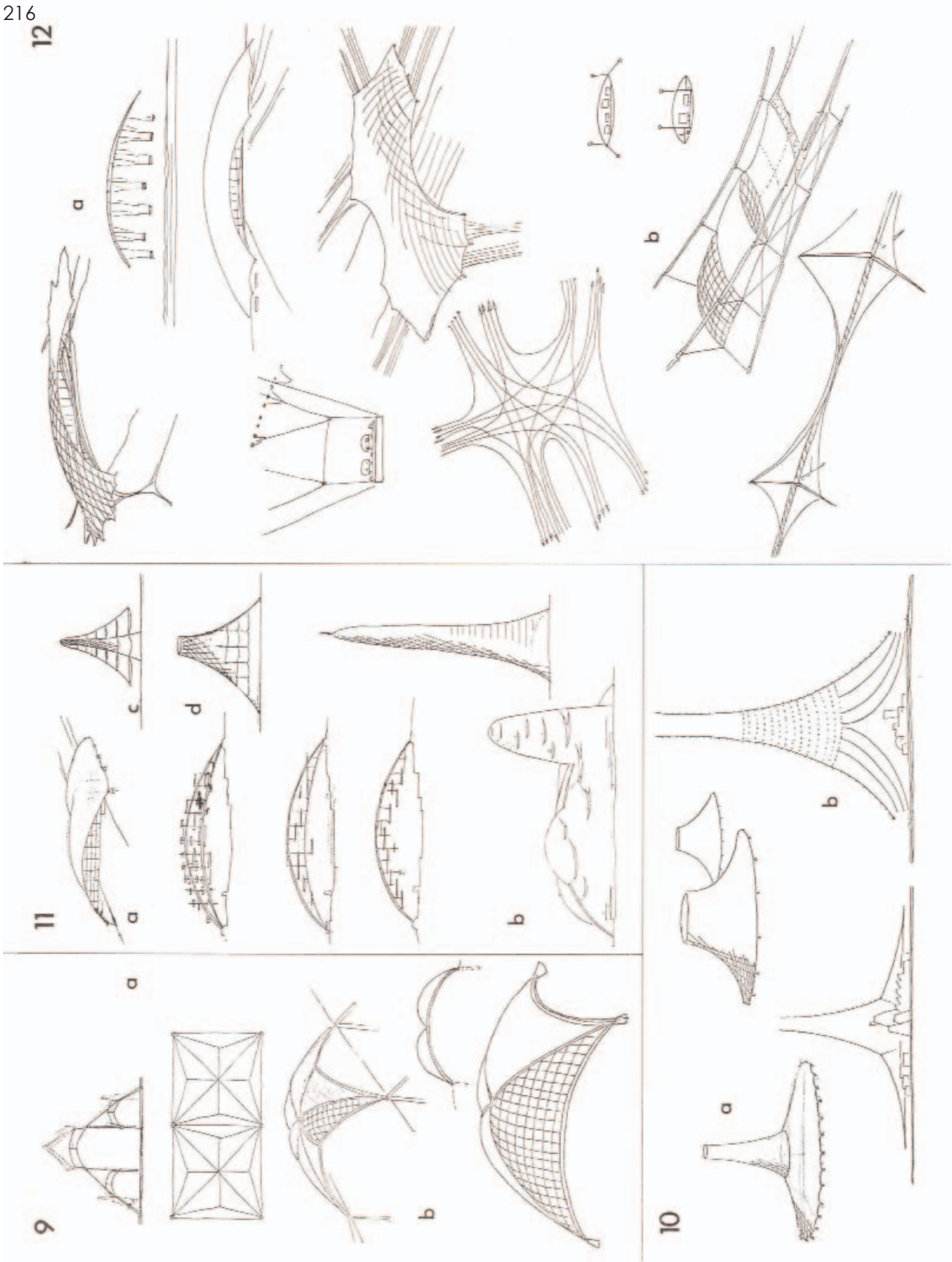
Fig. 214 a 221. Croquis exploratorios de las posibilidades de las bóvedas de celosía para la arquitectura, realizados por Frei Otto. Fuente: IL 10 pág. 257 y 259 a 265.

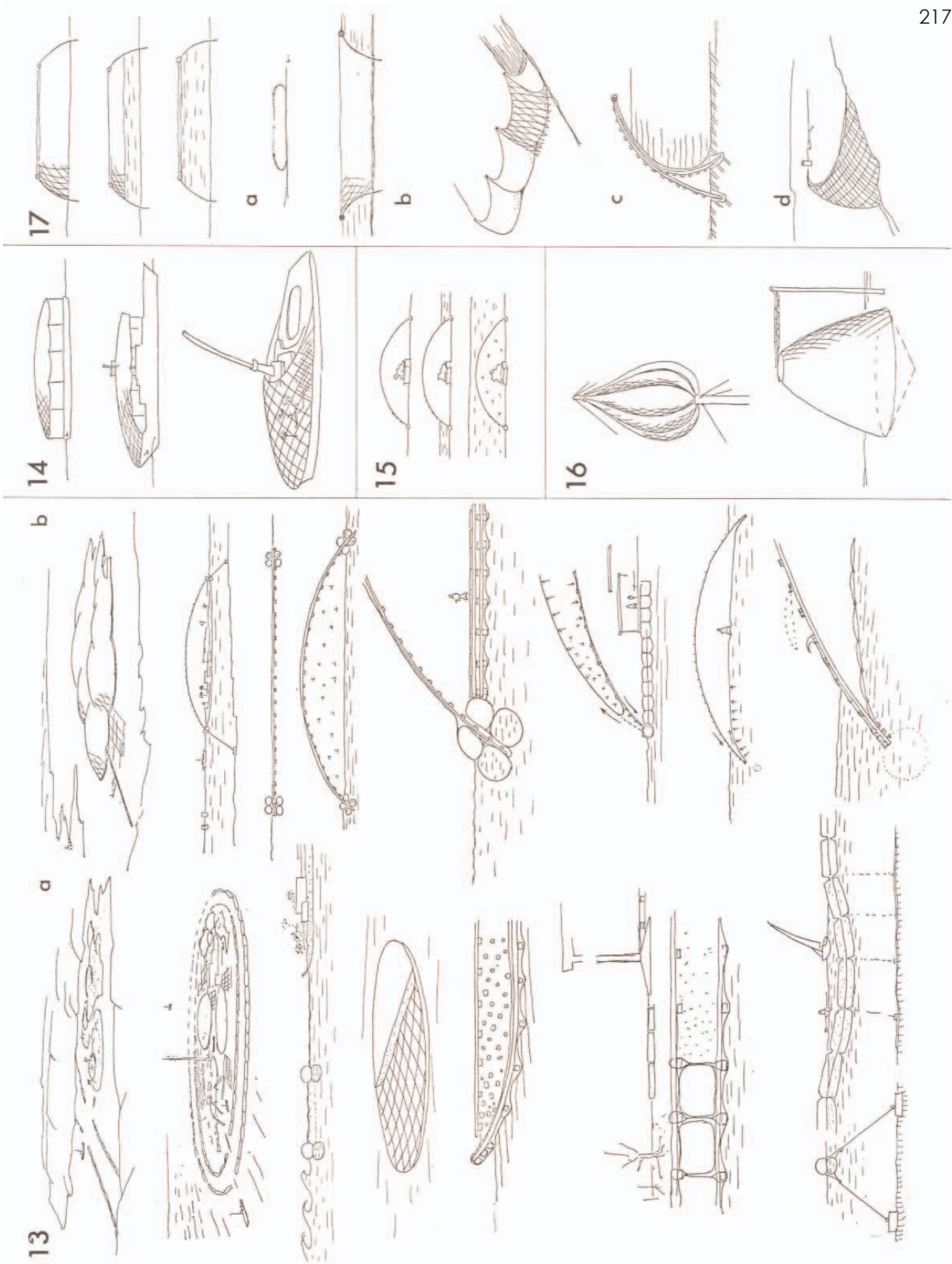
214



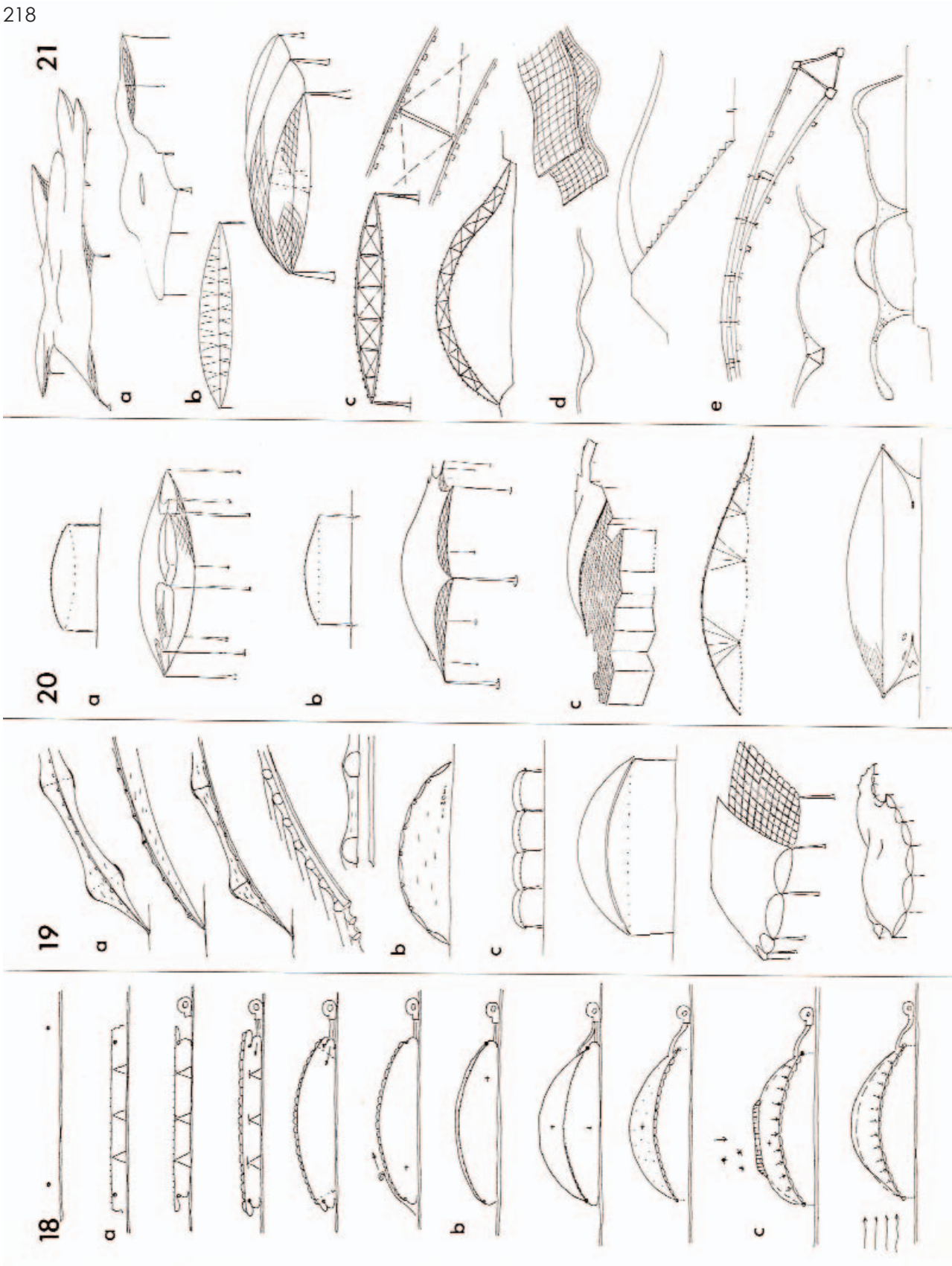


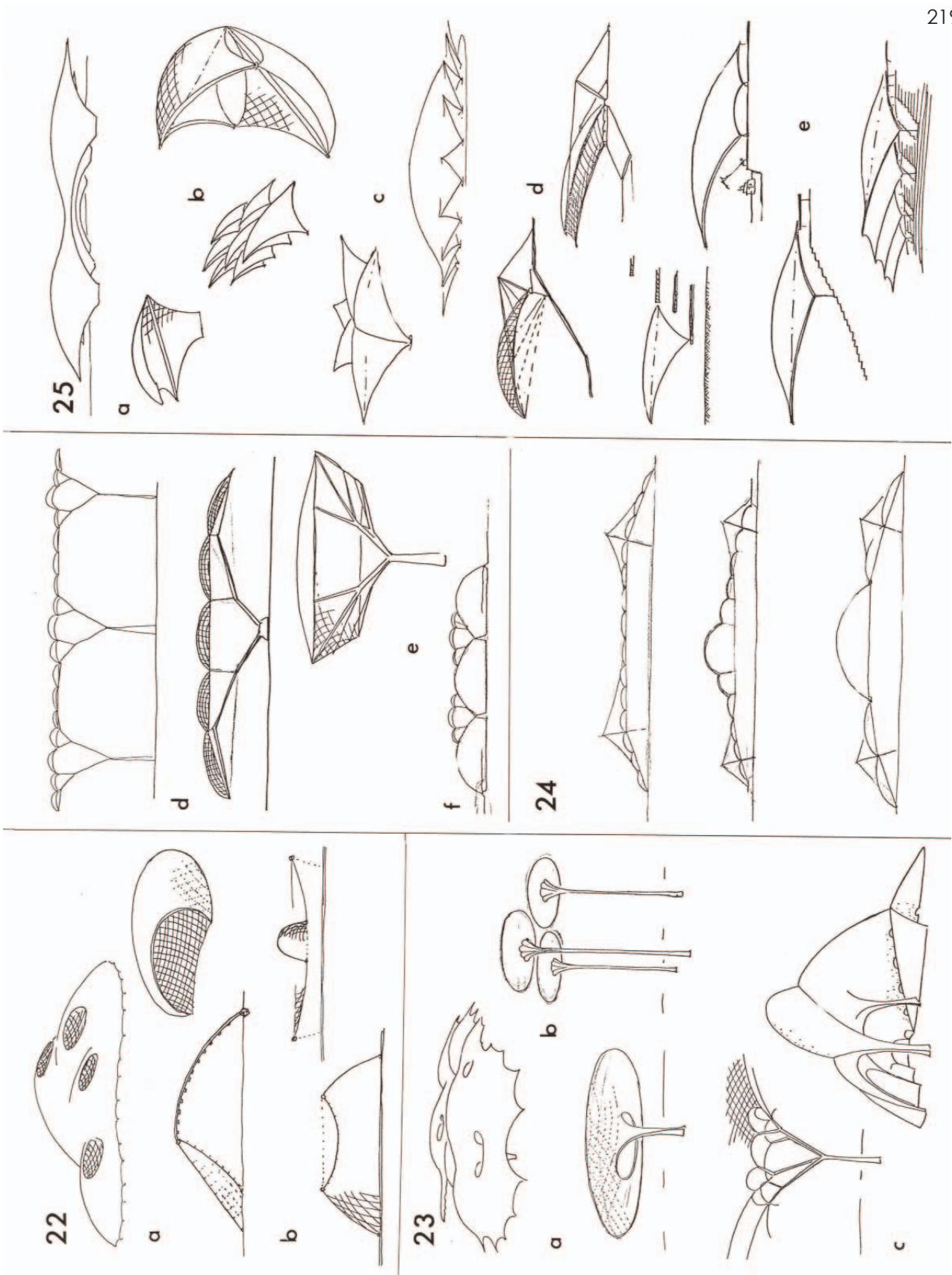
216



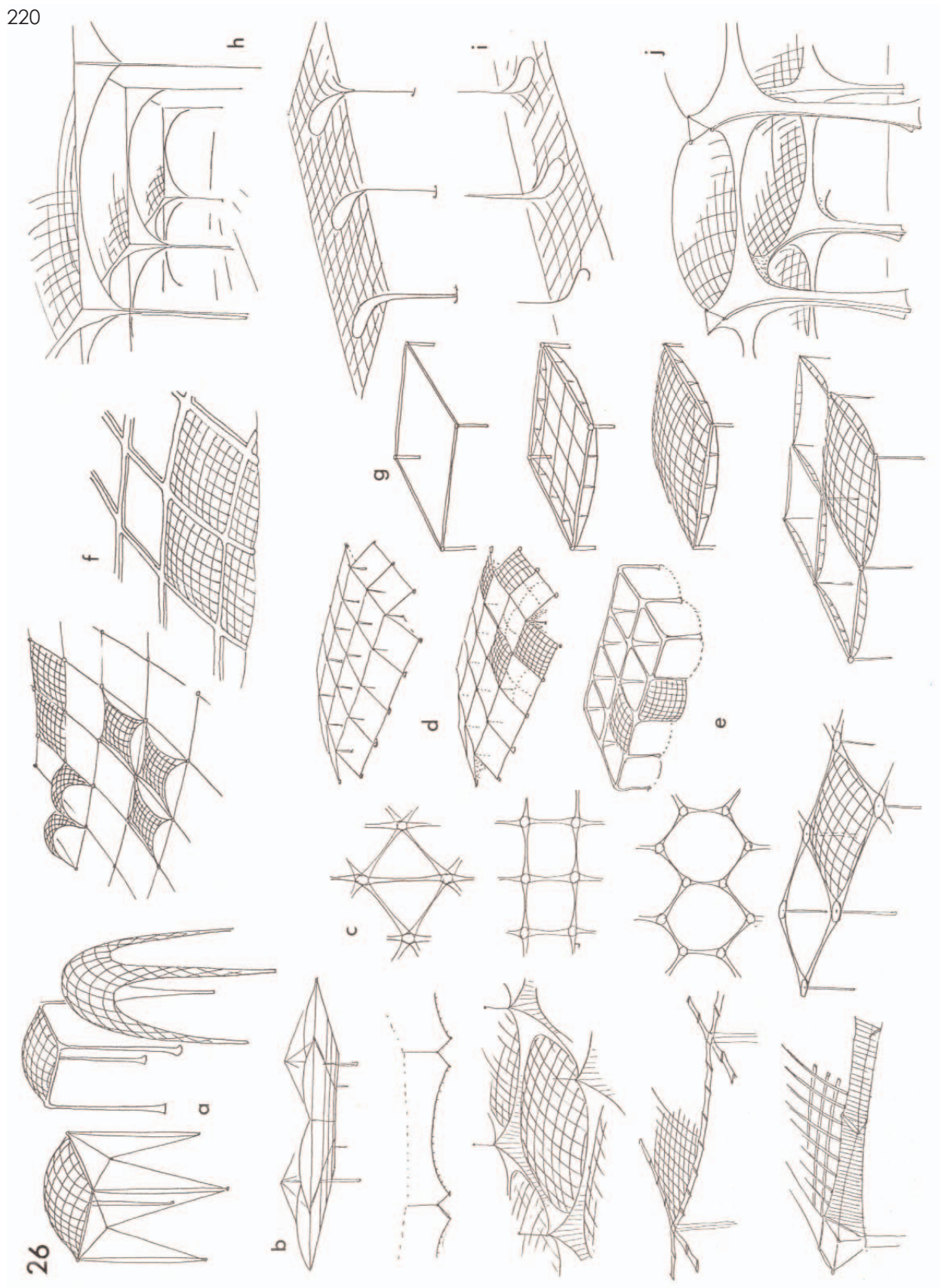


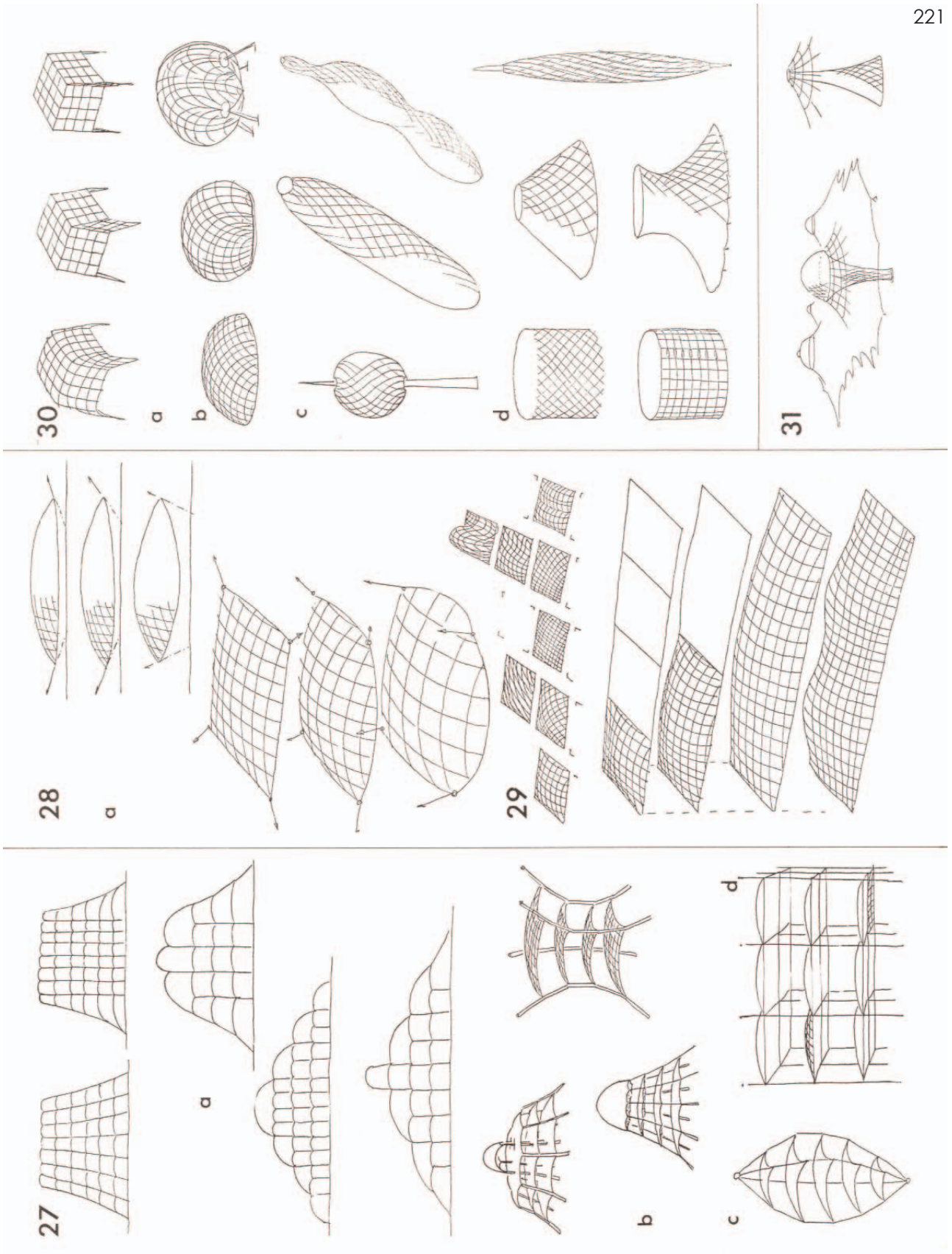
218





220





VII. Conclusiones

A modo de conclusión vamos a resumir aquellos aspectos más importantes desarrollados en esta tesis y que pueden considerarse como aportaciones de interés para el estudio y la profundización en el conocimiento de la reflexión teórica y el esfuerzo de sistematización de Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart en la búsqueda de la forma resistente.

En primer lugar, se ha presentado la experiencia de los ingenieros en la búsqueda de la forma resistente con los nuevos materiales que la industria ponía a disposición de las obras públicas como un importante antecedente que marca una tradición dentro de la cual podemos encuadrar la obra y la aportación de Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart. El hierro y el acero experimentan a lo largo de la Revolución Industrial un desarrollo importante que se manifiesta en su presencia en muchos diseños de obras públicas a lo largo del siglo XIX, de la mano de los ingenieros, en su mayor parte. Este desarrollo se prolonga a lo largo del siglo XX con la incorporación a la construcción de otros nuevos materiales: el hormigón, el hormigón armado, el acero de alta resistencia a tracción, el hormigón pretensado. El papel que asume la ciencia en la formación de los ingenieros tiene una importancia crucial en la manera de abordar éstos el diseño de sus obras con estos nuevos materiales. Efectivamente, sus diseños no son el resultado de una interpretación formal del hecho resistente, sino que tienden a ser el descubrimiento de su esencia. Hay entre los ingenieros una conciencia de que lo resistente tiene la exigencia de ser desvelado formalmente, de que no es algo interpretable, sino algo por descubrir que debe ser traducido en formas. De esta manera, la forma no se concibe como un *a priori*, sino como una consecuencia.

Pero por otro lado hemos mostrado cómo la experiencia de los ingenieros más innovadores en la creación de formas con los nuevos materiales del siglo XX nos pone de manifiesto la existencia de una sensibilidad estética, de una cultura de la forma, junto a lo que sería lo más característico de la profesión de ingeniero: su formación científica. Así las obras de estos ingenieros, pioneras de la estética del siglo XX, son el fruto de la convergencia de una sólida formación científica con una cultura visual, que posibilitará una percepción física, gráfica y formal del fenómeno resistente.

El pliegue, la curvatura simple, la doble curvatura, son algunos de los principios estructuradores de la forma resistente que podemos encontrar en los ejemplos analizados de la obra de los ingenieros seleccionados. Principios que coinciden con los resultados de las investigaciones de la relación entre forma y material del curso preliminar de la Bauhaus dirigido por Josef Albers, en el que la experimentación con materiales en busca de la coherencia en la relación entre el material y la forma resistente nos presenta una aspiración común con estos ingenieros. Esa integración entre estructura y forma, objetivo compartido por estos ingenieros y algunos de los exponentes más destacados de las vanguardias artísticas del siglo XX, como el ya mencionado en la Bauhaus, constituye una cierta cualidad de belleza abstracta que será uno de los aspectos más característicos de la estética del siglo XX.

Consideramos también importante comprobar, como fruto de esta investigación, cómo la metodología de trabajo e investigación desarrollada por Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de

Stuttgart participa de esta fuerte componente experimental. En sus procesos de búsqueda, determinación y optimización de la forma resistente encontramos que el uso de las maquetas experimentales es un instrumento fundamental. Los ensayos con películas de jabón para encontrar superficies mínimas, las maquetas de cadenas y tejidos suspendidos para producir las formas antifuniculares de arcos, bóvedas y cáscaras que trabajen a compresión, o los ensayos para investigar sistemas de caminos mínimos y estructuras ramificadas, son algunos de los exponentes de esa filosofía del diseño que veíamos en la tradición de los ingenieros donde la forma deja de ser un *a priori* para pasar a ser la consecuencia de un proceso de búsqueda en el que lo resistente tiene la exigencia de ser desvelado formalmente, es algo por descubrir que debe ser traducido en formas.

Retomando la racionalidad técnico-científica de los ingenieros en la forma de abordar el diseño de las obras con los nuevos materiales, la experiencia de Frei Otto entronca con el racionalismo estricto de los inicios de la arquitectura moderna, un objetivo inicial que quedó reducido a la expresión de una actitud racionalista en la obra de muchos de los pioneros de la arquitectura moderna, sin llegar a tener un desarrollo significativo con un corpus de conocimiento consolidado. Al centrar en esta tesis la atención en la experiencia de metodología, investigación y sistematización de Frei Otto y su instituto en la búsqueda de la forma resistente, observamos cómo recobra vigencia ese objetivo inicial de la arquitectura moderna.

El afán permanente de sistematización de la forma resistente que hemos detectado a lo largo de la trayectoria de Frei Otto refleja un intento de esta-

blecer un orden inteligible que permita el análisis y la clasificación ordenada y sistemática, uno de los objetivos que sustenta cualquier empresa de racionalidad. Esta aportación teórica de Frei Otto representa, pues, un nexo de continuidad en la cadena de textos teóricos elaborados por los arquitectos alemanes en las primeras décadas del siglo XX, en las que se aborda el conocimiento de la arquitectura utilizando los métodos y las técnicas propias de la investigación racional lógico-deductiva, centrándose generalmente en términos de reducción relativos a la forma de la arquitectura, y buscando establecer una clasificación o estructura interpretativa coherente que permita el conocimiento, la comprensión y la generalización del problema arquitectónico desde el particular punto de vista formal empleado.

Al abordar racionalmente la arquitectura ésta se “reduce” a los aspectos abordables que son susceptibles de ordenación y clasificación sistemática. Pero el arquitecto, cuando crea la arquitectura, quiere abarcarla en toda su complejidad, quiere abarcar en su globalidad el hecho arquitectónico, rebasando necesariamente el estrecho margen que le brinda el conocimiento racional.

Esta dialéctica entre conocimiento y creación observamos que cobra un interés especial en la experiencia de Frei Otto al sobrepasar los límites del pensamiento racional aplicado a la arquitectura. En efecto, esta necesidad de tener una visión de conjunto del mayor número de posibilidades dentro del campo de las estructuras parece que entre en contradicción con una actividad creadora capaz de imaginar nuevos tipos estructurales, de traspasar los límites de lo ya conocido, de lo ya establecido. Sin

embargo observamos cómo esa necesidad de sistematizar y ordenar el mundo de las estructuras no representa un esquema rígido que coarte la creatividad al tener que referir a él toda nueva idea, sino más bien un mapa que señala nuevos campos todavía inexplorados, un torrente de nuevas posibilidades que se plantean a partir de unos criterios ordenadores que contribuyen a ubicar y delimitar conceptos y sistemas.

Las exploraciones gráficas y experimentales de combinaciones y relaciones que ofrece Frei Otto en sus catálogos de tipos estructurales, tal como hemos mostrado en este trabajo de investigación, nos sugieren una similitud con el método de Leonardo da Vinci, en el que la observación de la naturaleza adquiere una importancia primordial, y mediante el cual la búsqueda de la sistematización de las posibilidades de combinación hace que la creación de la forma espacial, por ejemplo la exploración gráfica de los templos de planta central, se convierta en una cuestión de combinatoria científica.

Observamos en nuestra investigación cómo las clasificaciones de Frei Otto están realizadas desde un planteamiento globalizador de las formas y los objetos, que revela como trasfondo las áreas de interés y los objetivos de las investigaciones desarrolladas en el grupo "*Biologie und Bauen*", donde encontramos, por un lado, la búsqueda de unos principios comunes entre los objetos de la naturaleza y los objetos creados por el hombre, y por otro lado una visión del hombre y de la arquitectura en concordancia con el sistema ecológico que lo rodea para formar con él una misma unidad, una parte inseparable y acorde con el todo. Es un planteamiento que con-

trasta con el de otros intentos de sistematización de la forma, más abstractos, más geométricos, menos orientados a la función resistente, realizados desde instituciones como la Bauhaus¹⁴⁷ o el Constructivismo ruso¹⁴⁸, que sentaron las bases del análisis de la forma en los actuales cursos de diseño básico¹⁴⁹, y que por ello han estado más influenciados por los logros de las vanguardias artísticas del primer tercio del siglo XX.

Otra conclusión de nuestra investigación es la importancia de la vertiente pedagógica de la reflexión teórica de Frei Otto, en la que sus análisis y sus intentos de sistematización de la forma resistente adquieren un gran valor didáctico como resultado de su experiencia investigadora y de su imaginación creadora. Encontramos también aquí una conexión con la pedagogía de la forma resistente desarrollada por algunos de los ingenieros más innovadores en la creación de formas con los nuevos materiales del siglo XX, entre los que podríamos mencionar a Eduardo Torroja, Mario Salvadori, Rowland J. Mainstone, y Mamoru Kawaguchi.

Al enlazar con la tradición de los ingenieros en la búsqueda de la forma resistente con nuevos materiales, aparece la aportación de Frei Otto como el siguiente eslabón, después de las estructuras laminares de hormigón armado, en ese proceso en el que, tal como señalaba Félix Candela, la historia de las

¹⁴⁷ Véanse por ejemplo los escritos pedagógicos sobre teoría de la forma de Paul Klee, recogidos en KLEE, P.: *Das bildnerische Denken*. Schwabe. Basilea, 1990 (1956).

¹⁴⁸ Véanse los escritos sobre los elementos y la generación de la forma de I. G. Chernijov, recogidos y traducidos al inglés en COOK, C.: *Chernikhov. Fantasy and construction*. Architectural Design Profile 55. A.D. Volume 54. Londres, 9/10-1984.

¹⁴⁹ Una muestra contemporánea de la sistematización de la forma en un curso de diseño básico nos la proporcionaría el conocido libro WONG, W.: *Fundamentos del diseño*. Gustavo Gili. Barcelona, 1997 (1993).

estructuras muestra una marcada tendencia a cubrir mayores espacios con menos material. Esta tendencia hacia una ligereza cada vez mayor, que tan gráficamente presentó Robert Le Ricolais al enunciar como objetivo último en el diseño de estructuras el eslogan "luz infinita, peso cero", sitúa a las estructuras traccionadas, después de los logros de ligereza alcanzados con las cáscaras delgadas de hormigón armado, como la etapa siguiente en ese proceso.

Con la utilización de los cables de acero y las membranas, la posibilidad de diseñar estructuras cuyo principal modo de trabajo sea a tracción, evitando los problemas de pandeo de las estructuras comprimidas esbeltas y las limitaciones de las solicitadas a flexión, hace que se puedan cubrir mayores luces con un peso propio muy reducido con relación a las cargas que se deben soportar. En contrapartida los materiales utilizados son muy flexibles, sin rigidez propia, lo que hace que el principal reto sea el asegurar la indeformabilidad de la estructura. Como resultado de la investigación realizada hemos comprobado cómo en ese afán permanente de sistematización de la forma resistente que hemos detectado a lo largo de la trayectoria de Frei Otto, está presente, como trasfondo, la búsqueda de geometrías que posibiliten esta indeformabilidad de las redes de cables y membranas, en las que las superficies de doble curvatura anticlásticas asumen un papel primordial.

Frei Otto, de formación arquitecto, aunque muchas veces, al igual que ha ocurrido con otros arquitectos, como Félix Candela, ha sido considerado ingeniero por sus diseños innovadores en el campo de las estructuras, ha planteado en repetidas ocasiones la necesidad de un enfoque interdiscipli-

nar para la investigación en la arquitectura, que salve la división artificial entre las artes y las ciencias. Este aspecto no ha sido apenas desarrollado en las referencias a su obra más habituales. En este trabajo hemos querido desarrollar este aspecto, centrando la atención en su experiencia de metodología, investigación y sistematización en la búsqueda de la forma resistente. Ello nos ha llevado a constatar la importancia que los grupos interdisciplinarios de colaboradores han tenido a lo largo de la actividad de Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart.

Desde el grupo de investigación *Biologie und Bauen* hasta los participantes en los dos programas de investigación auspiciados por el gobierno alemán en los que Frei Otto y su instituto asumen un papel fundamental, el programa SFB 64 *Weitgespannte Flächentragwerke* (Estructuras ligeras de grandes luces) y el programa SFB 230 *Natürliche Konstruktionen* (Estructuras naturales), encontramos además de arquitectos e ingenieros, biólogos, físicos, geodestas, matemáticos y filósofos. Esta presencia constante de especialistas de muy distintos campos entre los colaboradores de Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart revela como trasfondo de toda su actividad un deseo profundo por conocer y establecer conexiones con otras disciplinas desde un planteamiento globalizador que trae como consecuencia la superación del prejuicio de la autonomía de la disciplina arquitectónica.

Por último aparece también como conclusión del estudio realizado la necesidad de desvincular a Frei Otto del High Tech y de sus precursores para poder entender con profundidad el sentido de su obra y su aportación a la arquitectura desde su

pensamiento y su metodología. Planteamos como contexto más adecuado su entronque con la tradición de los ingenieros en la búsqueda de la forma resistente con nuevos materiales a lo largo del siglo XX, en cuya obra, frente a la retórica contemporánea del High Tech, de la búsqueda deliberada del alarde, del efecto, de la espectacularidad como primer objetivo, se ha planteado la búsqueda de la adecuación entre el material y la forma resistente con unos valores de autenticidad y sinceridad, ética y responsabilidad social, por los que adquiere plena vigencia esa aportación.

VIII. Epílogo.

Al concluir este trabajo de investigación con un apartado denominado "Conclusiones" no hemos pretendido dar por cerrada esta investigación con unas conclusiones definitivas. El tema de la investigación y los planteamientos del propio Frei Otto, siempre abiertos a múltiples posibilidades, no podrían estar en concordancia con unas conclusiones de estas características. La propia dinámica de esta investigación, a medida que iba avanzando, ha ido multiplicando en número y en profundidad los aspectos y las dimensiones que ofrecía la rica y poliédrica realidad de los trabajos de Frei Otto y sus colaboradores. La conciencia de haber descubierto en ellos un vasto y rico universo hacía cada vez más necesario perfilar y acotar al máximo el tema de nuestra investigación, dentro de este inmenso campo que se nos abría.

En nuestro trabajo nos hemos centrado en la dimensión sistematizadora de la experiencia metodológica e investigadora de Frei Otto en la búsqueda de la forma resistente, siguiendo un proceso que va de lo general a lo particular, de la forma y la estructura, consideradas en un sentido amplio, a dos sistemas estructurales planteados y desarrollados por él: las redes de cables y las cáscaras o bóvedas de celosía. Este perfil temático centrado en este esfuerzo del propio Frei Otto de sistematizar el universo de formas y estructuras que él mismo iba desarrollando e investigando nos permitía por un lado tener una visión panorámica y ordenada de la vasta y prolífica experiencia de Frei Otto, y por otro, recoger su planteamiento globalizador de la arquitectura en el contexto del mundo físico, y su reflexión sobre la relación entre forma y estructura. Al mismo tiempo, este perfil temático también nos permitía

recoger la componente didáctica de esta dimensión sistematizadora con vistas a explorar sus posibilidades docentes. Pero al acotar el tema ciñéndonos a esta dimensión sistematizadora de la experiencia de Frei Otto eran también muchos los aspectos que quedaban de lado sin abordar.

No podíamos, por tanto, al concluir esta investigación, dejar de mencionar, a modo de epílogo, algunos de estos campos que forman esta vasta y rica aportación de Frei Otto y sus colaboradores, que aunque no hayan sido abordados en profundidad en este trabajo, se vislumbran como amplios territorios para la investigación, como temas que podrían ser objeto de otros trabajos.

En primer lugar habría que mencionar las investigaciones de Frei Otto y sus colaboradores sobre las estructuras naturales y la relación entre la arquitectura y la naturaleza. En estos estudios no se busca en la naturaleza modelos o analogías formales, sino que se investiga sus procesos de generación de la forma, y se analiza en las estructuras naturales la relación entre forma, fuerza y masa¹⁵⁰. Tal como hemos indicado anteriormente, de vital importancia en este campo ha sido la interdisciplinariedad, los trabajos del grupo de investigación "*Biologie und Bauen*", la colaboración con biólogos como Johann Gerhard Helmcke o Werner Nachtigall, y otros muchos científicos y especialistas de campos como la biónica, que tanto en este grupo de investigación como a través del programa de investigación SFB 230 *Natürliche Konstruktionen*, encontraron un cauce para la participación.

¹⁵⁰ Véase OTTO, Frei: "Zum Vorbild Natur", en OTTO, F.: *Prinzip Leichtbau / Lightweight Principle*. Krämer. Stuttgart, 1998. (IL 24). Pág. 193-197.

En este campo se perfilan como temas de interés los análisis de procesos, mecanismos y principios de formación de objetos y estructuras en la naturaleza y en la técnica, reflejados en publicaciones como las ya mencionadas tituladas *Natürliche Konstruktionen* y *Gestaltwerdung*¹⁵¹. También cobran interés dentro de este campo los estudios sobre temas más específicos, documentados en los volúmenes de la serie “*Mitteilungen des IL*”¹⁵² que se indican entre paréntesis, tales como los dedicados a las redes (IL 8), las estructuras neumáticas (IL 9 y 19), y las cáscaras – diatomeas (IL 28 y 38) y radiolarias (IL 33) – en la naturaleza y la técnica, así como los dedicados a las estructuras neumáticas y los huesos (IL 35), y a las construcciones de bambú (IL 31). También encontramos documentados estos y otros temas específicos, como el de las ramificaciones o estructuras arborescentes, en las series publicadas en el marco del programa de investigación SFB 230 denominadas “*Konzepte des SFB 230*” y “*Mitteilungen des SFB 230*”¹⁵³.

En este contexto de las estructuras naturales y la relación entre la arquitectura y la naturaleza sería también de gran interés analizar la relación de los estudios de Frei Otto con los de otros autores relevantes en este campo, como D'Arcy Wentworth Thompson, Gaudí o Le Ricolais. El estudio y la observación de la naturaleza es actualmente uno de los temas que más atrae la atención de Frei Otto, como demuestra el tema del libro en el que está actualmente trabajando, “Las redes en los seres vivos”, en el que estudia las redes que hay en la naturaleza vivien-

¹⁵¹ Véase apartado IX.2 Frei Otto como autor o editor de libros, en IX. Bibliografía.

¹⁵² Véase apartado IX.5 Publicaciones del IL. Serie *Mitteilungen*, en IX. Bibliografía.

¹⁵³ Véase la relación completa de los volúmenes de estas dos series en la base de datos de la biblioteca de la Universidad de Stuttgart accesible desde internet en la dirección www.biss.belwue.de

te, su origen y su evolución, analizando las aportaciones de tres importantes biólogos que fueron miembros del grupo "*Biologie und Bauen*" o participaron en las investigaciones del programa SFB 230: Johann Gerhard Helmcke, Ulrich Kull y Adolf Seilacher¹⁵⁴.

Otro amplio campo que merecería una profunda investigación sería la metodología experimental de Frei Otto y el uso de las maquetas, los ensayos y los procesos físicos de autogeneración de la forma como instrumento en la búsqueda y la optimización de la forma resistente. Interesaría analizar la vigencia actual de esta metodología experimental con relación a las posibilidades que ofrecen los ordenadores, apreciando el valor diferenciado de los experimentos físicos con maquetas como instrumento para inventar, para encontrar lo no buscado, tal como plantea Frei Otto¹⁵⁵, y para una comprensión cualitativa de la relación entre la forma y lo resistente.

Habría que indagar en todo el vasto patrimonio de maquetas y ensayos que se encuentra documentado en los archivos del Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart y del estudio de Frei Otto en Warmbronn, analizándolo y ordenándolo según los diferentes tipos de procesos físicos utilizados, según materiales, formas, sollicitaciones, instrumentos, aparatos y medios. Dos volúmenes de la serie "*Mitteilungen des IL*" ofrecen abundante documentación y una cierta sistematización sobre el tema de los experimentos: el IL 25 desde un enfoque más general, considerándolos en su globalidad, y el IL 18, centrado más específicamente en los ensayos con pompas de jabón.

¹⁵⁴ Ver transcripción de la conversación mantenida con Frei Otto el 7 de junio de 2004.

¹⁵⁵ *Ibidem*.

De gran interés en este campo de la metodología experimental de Frei Otto sería estudiar y analizar los trabajos e investigaciones del “*Institut für Modellstatik*” de la Universidad de Stuttgart, fundado por Fritz Leonhardt en 1964¹⁵⁶, para conocer las leyes propias de las maquetas, lo que Frei Otto denomina “*Modellgesetze*”¹⁵⁷, y los fundamentos de la estática de maquetas y la mecánica experimental. A este respecto se perfilan como relevantes las aportaciones de dos profesores de este instituto que participaron como investigadores responsables de uno de los proyectos parciales en el programa de investigación SFB 230: Lothar Wessolly y Robert K. Müller¹⁵⁸.

También sería interesante analizar la vigencia actual de esta metodología experimental como propuesta didáctica para una pedagogía de la forma resistente, y la relevancia de esta visión cualitativa de lo resistente con relación al diseño conceptual de las estructuras. Conviene mencionar aquí por un lado las aportaciones del simposio internacional de la “*International Association for Shell and Spatial Structures*” celebrado en 1996 en Stuttgart y organizado por Jörg Schlaich y su departamento de la universidad de esa ciudad en torno al tema del diseño conceptual de estructuras¹⁵⁹, así como las experiencias docentes reflejadas en el número especial del *International Journal of Space Structures*, publicado en 2002 y dedicado a la docencia de este tipo de estructuras, en el que siendo la mayoría de los autores ingenieros, “casi sin excepción todos ellos promo-

¹⁵⁶ *Ibidem.*

¹⁵⁷ *Ibidem.*

¹⁵⁸ Ver MÜLLER, Robert K.: *Handbuch der Modellstatik*. Berlín / Heidelberg, 1971.

¹⁵⁹ Ver A.A.V.V.: *Conceptual Design of Structures. Proceedings of the IASS Symposium 1996. Stuttgart*. Institut für Konstruktion und Entwurf II. Universität Stuttgart. Stuttgart, 1996.

vían el uso de maquetas físicas para generar una comprensión cualitativa del comportamiento de las estructuras tridimensionales y al mismo tiempo de sus cualidades espaciales"¹⁶⁰.

De indudable interés sería además analizar la relación de esta metodología experimental con el papel de las maquetas y los ensayos físicos en el diseño de las obras de otros ingenieros o grandes constructores como Gaudí, Maillart, Torroja, Freyssinet, Nervi o Isler. Y por supuesto no dejar de abordar también el problema de la escala¹⁶¹: lo que es válido a pequeña escala puede no serlo en la gran escala. Sobre todo en lo referente a las maquetas o los ensayos para la generación de la forma¹⁶², no tanto con relación a las maquetas para el cálculo de tensiones o deformaciones, donde esta cuestión de la transferencia de los resultados obtenidos en los ensayos a la realidad parece que se ha tratado con mayor profusión.

Otro tema de gran relevancia y permanencia en la experiencia de Frei Otto ha sido el "principio de la construcción ligera" ("*Prinzip Leichtbau*") y todas las reflexiones e investigaciones acerca de la eficacia, rendimiento, consumo o empleo de material y energía en el diseño y construcción de estructuras. El desarrollo del método que permite cuantificar y comparar estas propiedades en todo tipo de objetos, tanto de la naturaleza como de la técnica, mediante la fór-

¹⁶⁰ Ver CHILTON, John C.: "Preface", en *International Journal of Space Structures. Special Issue: Teaching of Space Structures*. Vol. 17. Nº 2 & 3. 2002. Pág. i. La traducción es propia.

¹⁶¹ Ver MANTEROLA, Javier: "La estructura resistente en la arquitectura actual", en *Informes de la Construcción* nº 456-457. Jul-Oct. 1998. Pág. 25-26.

¹⁶² Ver transcripción de la conversación mantenida con Frei Otto el 7 de junio de 2004, y también la mantenida con Jürgen Hennieke el 15 de oct. de 2004.

mula o el concepto de “*Bic*” (la relación entre masa empleada y el producto de la fuerza transmitida por la distancia a la que se transmite) da lugar a una larga serie de investigaciones para determinar estos valores en una gran variedad de objetos y establecer unos diagramas comparativos. Toda esta experiencia y reflexión queda recogida en el volumen IL 24 de la serie “*Mitteilungen des IL*”, considerado por Frei Otto como una de sus publicaciones más importantes.

Cabría plantearse la repercusión que han tenido estos estudios de Frei Otto, y la relación de este principio con la reflexión sobre la economía cósmica, la ligereza o el mínimo consumo de masa y energía como objetivos de diseño de otros ingenieros, como Carlos Fernández Casado, Eladio Dieste o Jörg Schlaich. En estrecha vinculación con este principio de la construcción ligera, la idea de resistir con la forma, la percepción de la adecuación entre forma y fuerza, entre lo construido y las leyes de la naturaleza, los conceptos de lo genuino, la autenticidad o la necesidad, se presentan también como categorías relevantes para el juicio estético en el campo de las estructuras. Sería también de interés analizar las afinidades y las diferencias entre el minimalismo en la obra de arquitectos como Mies van der Rohe y este principio de la construcción ligera.

Otro aspecto que destaca como objeto de investigación en la experiencia de Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart es la consideración que se le ha dado a la historia de la construcción. En efecto, este fue el tema de una de las áreas de investigación del programa SFB 230, uno de cuyos objetivos era estudiar la conexión entre las estructuras o las construcciones históricas

con las estructuras naturales, perfilándose así este instituto como pionero en esta materia, que desde hace algunos años ha ido adquiriendo un creciente interés. Los trabajos e investigaciones sobre este tema, tratados en frecuentes coloquios y seminarios que aglutinaron diferentes especialistas en este campo en el marco del programa SFB 230, se encuentran documentados en diferentes volúmenes de la serie "*Konzepte des SFB 230*", así como en publicaciones tales como la titulada "*Zur Geschichte des Konstruierens*"¹⁶³ (Sobre la historia de la construcción), editada por Rainer Graefe en 1989, que junto con Jos Tomlow fue el principal responsable de esta área en el instituto.

Hay que resaltar, también en este ámbito, el volumen IL 37 de la serie "*Mitteilungen des IL*", escrito por Frei Otto y titulado "*Alte Baumeister: was könnten die alten Baumeister erfunden haben?*"¹⁶⁴ (Los antiguos maestros constructores: ¿qué podrían haber inventado los antiguos maestros constructores?), en el que Frei Otto recoge su reflexión sobre las ideas y los métodos, el origen y desarrollo de las grandes invenciones en la historia de las construcciones, con una visión de la historia de la arquitectura como historia de grandes invenciones, en la que él ve reflejada y proyectada su experiencia como inventor de estructuras.

Son múltiples las cuestiones que suscita la experiencia y los trabajos de Frei Otto y sus colaboradores. Además de las ya reseñadas, se podrían mencionar brevemente también las siguientes:

¹⁶³ GRAEFE, Rainer (ed.): *Zur Geschichte des Konstruierens*. Deutsche Verlags-Anstalt. Stuttgart, 1989.

¹⁶⁴ OTTO, Frei: *Alte Baumeister: was könnten die alten Baumeister erfunden haben / Ancients Architects: what could the Ancient Master Builders have invented?*. Krämer. Stuttgart, 1994. (IL 37).

A. La dialéctica entre la búsqueda de la forma siguiendo procesos físicos de autogeneración, planteada por Frei Otto, y el proceso de definición de la forma en el proyecto arquitectónico. Esta cuestión, ya expuesta en el apartado III.5.2 sobre la metodología experimental y la búsqueda de la forma resistente, suscita también la dialéctica entre el análisis y la síntesis arquitectónica, entre la "reducción" que conlleva todo análisis, toda clasificación, sistematización o intento de racionalización de la arquitectura, y la necesidad de abarcar la arquitectura en toda su complejidad y globalidad durante el proceso creativo del proyecto arquitectónico.

B. El pensamiento de Frei Otto sobre lo estético, reflejado muy particularmente en su escrito titulado "*Das Ästhetische*" (lo estético), y en sus intervenciones en el debate escrito desarrollado a partir de este texto, publicados ambos como anexo en el volumen IL 21 de la serie "*Mitteilungen des IL*"¹⁶⁵, plantea la relación forma – fuerza – masa como una de las claves para apreciar y percibir las cualidades estéticas de los objetos materiales, apareciendo así el principio de la construcción ligera como categoría del juicio estético y principio básico para la comprensión de lo estético de los objetos materiales.

C. La reflexión actual sobre la relación forma – estructura entre los continuadores del legado de Frei Otto y de los grandes constructores, que podemos encontrar en grupos o instituciones internacionales que aglutinan tanto ingenieros como arquitectos interesados en esta reflexión, tales como la

¹⁶⁵ Ver OTTO, Frei: "*Das Ästhetische*" y A.A.V.V.: "*Debatte zum Thema 'Das Ästhetische'*", en A.A.V.V.: *Grundlagen. Form, Kraft, Masse 1 / Basics. Form, force, mass 1*. Krämer. Stuttgart, 1979. (IL 21). Pág. 140-187.

Fig. 222. Aeropuerto de Denver, 1994. Membrana ondulada con crestas y valles paralelos. Fuente: BERGER, Horst: *Light Structures*. p. 142.

Fig. 223. Piscina cubierta en Neckarsulm, 1989. Fuente: HOLGATE, Alan: *The Art of Structural Engineering*. p. 109.

*International Association for Shell and Spatial Structures*¹⁶⁶, muy específicamente el grupo de trabajo centrado en la morfología estructural¹⁶⁷, así como el *Space Structures Research Centre*¹⁶⁸ de la Universidad de Surrey, fundado por Z. S. Makowski, o la *International Association for Bridge and Structural Engineering*.

Por otro lado es evidente el interés y la pertinencia que tendría el análisis de la evolución posterior y el eco contemporáneo de las innovaciones de Frei Otto y su instituto, siguiendo la evolución más reciente de las estructuras ligeras en las que él fue pionero. Estructuras de membranas, como el aeropuerto internacional de Denver (fig. 222), en Estados Unidos, en cuyo diseño asumió un papel fundamental Horst Berger¹⁶⁹, formado en la Universidad de Stuttgart, uno de los ingenieros que más ha contribuido al desarrollo reciente de este tipo de estructuras. Bóvedas o cáscaras de celosía de capa única, como la de la piscina de Neckarsulm (fig. 223) o la del patio del Museo de Historia de Hamburgo (fig. 224), resueltas por Jörg Schlaich¹⁷⁰, también profesor de la Universidad de Stuttgart, con un cuidado diseño de los nudos con tirantes pretensados que triangulan una celosía de barras formada por mallas cuadran-

¹⁶⁶ Ver las actas de los simposios internacionales que organiza esta asociación con periodicidad anual, así como la revista *Bulletin / Journal of the IASS*.

¹⁶⁷ Ver las actas de los coloquios y seminarios organizados por el *Structural Morphology Group* de la IASS, así como su *Newsletter*.

¹⁶⁸ Ver las actas de las cinco conferencias internacionales que desde 1966 cada nueve años ha organizado este prestigioso centro, así como la revista *International Journal of Space Structures*, publicada también por este centro.

¹⁶⁹ Véase BERGER, Horst: *Light Structures, Structures of Light*. Birkhäuser. Basel, 1996.

¹⁷⁰ Véase HOLGATE, Alan: *The Art of Structural Engineering, The Work of Jörg Schlaich and his Team*. Axel Menges. Stuttgart, 1997. Pág. 106-115. Ver también BÖGLE, Annette et al.: *Leicht weit - Light Structures, Jörg Schlaich Rudolf Bergermann*. Prestel. Munich, 2003. Pág. 114-118.

gulares (fig. 225), y en la segunda obra con una singular rigidización transversal con haces de tirantes radiales (fig. 224). También cabría mencionar, como desarrollos más recientes de esta tipología estructural, la bóveda de celosía construida para el *Weald and Downland Museum*¹⁷¹ (fig. 226) en Sussex, Inglaterra, en la que intervino la oficina de ingeniería *Buro Happold*, ya veterana en esta tipología estructural por su participación en la construcción del pabellón de Mannheim de 1975, así como la bóveda de celosía construida para el Pabellón del Japón en la Exposición Universal de 2000 en Hannover (fig. 227), formada por barras de tubo de cartón, en la que el propio Frei Otto asesoró a Shigeru Ban.



223

222



¹⁷¹ Véase HARRIS, R.; KELLY, O.: "The structural engineering of the Downland gridshell" , en las actas de la 5ª Conferencia Internacional sobre Estructuras Espaciales, PARKE, G.A.R.; DISNEY, P. (ed.): *Space Structures 5*. Thomas Telford. Londres, 2002. Vol I. Pág. 161-172.

Fig. 224. Bóveda de celosía del Museo de Historia de Hamburgo, 1989. Fuente: HOLTGATE, Alan: *The Art of Structural Engineering*. p. 115.

Fig. 225. Nudo con tirantes trianguladores de la celosía de la piscina de Neckarsulm. Fuente: HOLTGATE, Alan: *The Art of Structural Engineering*. p. 108.

Fig. 226. Bóveda de celosía del *Weald and Downland Museum*. Fuente: KELLY, O.J. et al., en *The Structural Engineer*. Vol 79. Nº 17. 4 Sept. 2001.

Fig. 227. Pabellón del Japón en la Exposición Universal de 2000 en Hannover. Fuente: LYALL, S.: *Maestros de la estructura*. Blume, 2002. p. 48



224

225a



225b





226

227

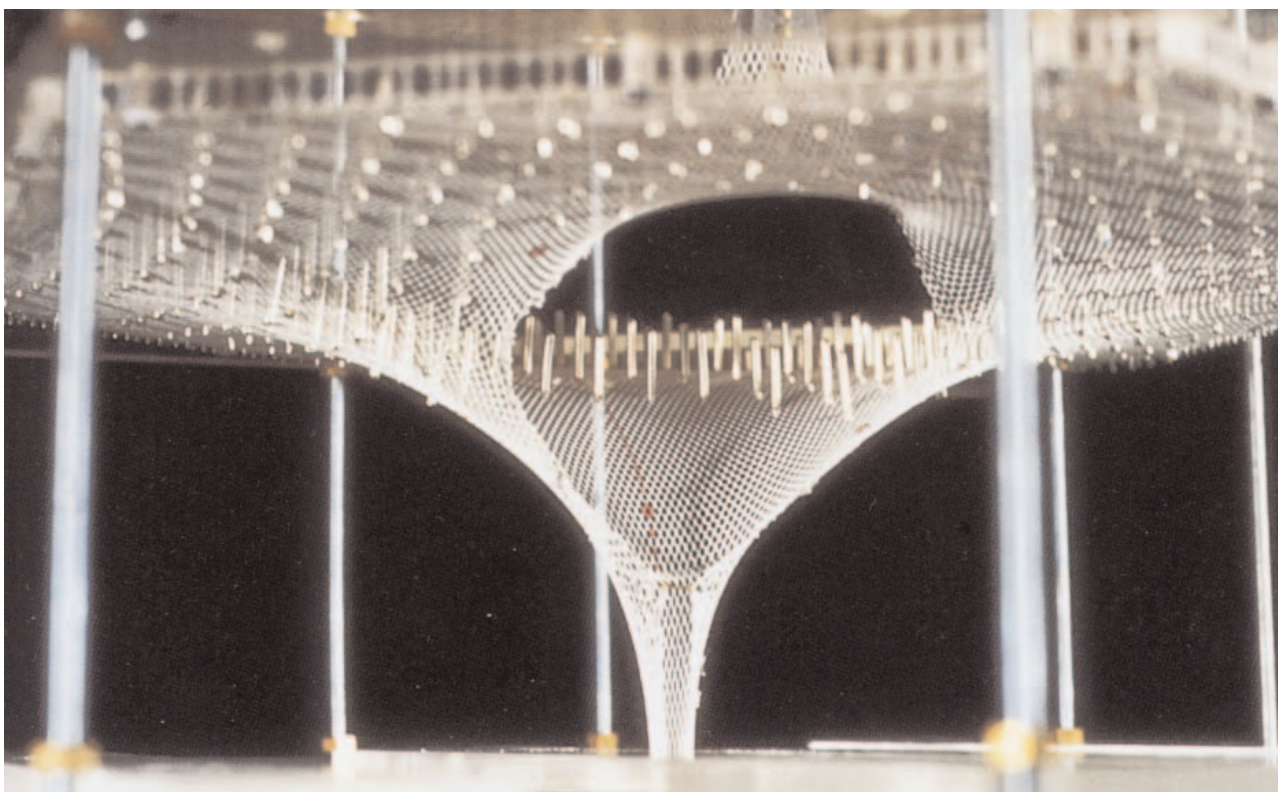


Finalmente como una muestra más de esta evolución reciente habría que mencionar el proyecto para la transformación de la Estación Central de Stuttgart (fig. 230), en el que ha intervenido como asesor el propio Frei Otto, planteando una bóveda perforada sobre los andenes subterráneos, cuya forma sigue la lógica de las mallas colgantes antifuniculares (fig. 229) o de las superficies mínimas de jabón (fig. 228).

228



229





230

Ante la perspectiva de más de cincuenta años de toda la trayectoria profesional e investigadora de Frei Otto llama la atención la coherencia, la permanencia y la continuidad en el tiempo de los temas y los objetivos de sus trabajos e investigaciones a lo largo de toda esa trayectoria, al margen de los gustos y las modas, las corrientes estéticas y los vaivenes de los media y la crítica, que ha intentado encajillar su aportación en el contexto de las arquitecturas de más fuerte componente tecnológica de la segunda mitad del siglo XX, sin llegar a valorar toda la riqueza y multiplicidad de aspectos y posibilidades que esta fecunda aportación ha abierto.

En efecto, es difícil encasillar su trabajo. No se percibe la intención de crear un estilo, las formas parecen intemporales, no han sido impuestas sino deducidas por procesos físicos de la naturaleza. Hay como una vuelta a los orígenes, una búsqueda de lo esencial. Los temas tratados, los objetivos perseguidos, los trabajos abordados tocan cuestiones básicas, elementales, esenciales, que han afecta-

Fig. 228 Maqueta de película de jabón para la nueva estación de Stuttgart, 2000. Fuente: OSSOWSKI, C. (ed.): *Geplante Poesie*. Pág. 38

Fig. 229 Maqueta colgante para la búsqueda de la forma de la bóveda para la nueva estación de Stuttgart, 2000. Fuente: OSSOWSKI, C. (ed.): *Geplante Poesie*. Pág. 39.

Fig. 230 Maqueta de la nueva estación de Stuttgart, 2000. Vista de la sala subterránea con los andenes. Fuente: OSSOWSKI, C. (ed.): *Geplante Poesie*. Pág. 41.

do siempre a la relación del hombre con su entorno. La arquitectura no se considera aisladamente como disciplina autónoma, sino totalmente interdependiente y entrelazada con otras disciplinas, con las ciencias, con los procesos de la naturaleza, hasta el punto de considerar la arquitectura y la construcción fundamentalmente como ciencias de la naturaleza.

Y aquí encontramos de nuevo la actualidad y la vigencia de la aportación de Frei Otto, al observar cómo la naturaleza, sus procesos y sus sistemas complejos vuelven a estar de nuevo en el centro de atención de paradigmas contemporáneos como el de la emergencia¹⁷², con el objetivo de crear sistemas artificiales que estén a la altura del nivel de complejidad e infatigable perfección de los sistemas del mundo natural.

La búsqueda de la forma mediante procesos naturales de autogeneración y autoorganización recobra hoy un renovado interés por cuanto se aleja de la máquina como modelo de la arquitectura, yendo más allá de cualquier noción mecanicista o estática de la forma arquitectónica, y permite aproximarnos a sistemas complejos adaptables comparables a los del mundo natural, como las colonias de hormigas o las redes de neu-

¹⁷² Véase HENSEL, M.; MENGES, A.; WEINSTOCK, M.(ed.): *Emergence: Morphogenetic Design Strategies*. Architectural Design. Vol 74, Nº 3 May./Jun. 2004. Es significativa la inclusión en esta publicación de una entrevista a Frei Otto realizada por los editores, que a su vez son los directores del programa Master "Emergent Technologies and Design" que se imparte actualmente en la Architectural Association (Londres).

Para conocer los fundamentos de este paradigma véase HOLLAND, J.: *Emergence from Chaos to Order*. Oxford University Press, 1998. y también JOHNSON, S.: *Emergence, the Connected Lives of Ants, Brains, Cities and Software*. Penguin Press, 2001.

ronas, en los que las propiedades del sistema no se pueden deducir de sus componentes, y el comportamiento del conjunto es mucho más complejo que el de sus partes¹⁷³.

La creación espontánea de un "conjunto organizado" a partir de una colección "desordenada" de partes interactuantes, tal como se observa en los sistemas autoorganizativos de la física, la química, la biología o la sociología, es una parte fundamental de este paradigma de la emergencia¹⁷⁴. Hemos visto cómo desde la fundación en 1961 del grupo de investigación "*Biologie und Bauen*" y a través de programas multidisciplinares de investigación como el *SFB 230*, centrado específicamente en las estructuras naturales, Frei Otto ha mostrado un interés y una necesidad de conocer la naturaleza teniendo presente toda su complejidad. Objeto preferente de sus investigaciones han sido los procesos naturales de autogeneración de formas, o de autoformación, entendiendo por éstos no sólo los procesos complejos de las estructuras autogeneradas en la naturaleza, sino también otros procesos humanos de autoorganización complejos, como los que afectan al desarrollo de estructuras de asentamientos¹⁷⁵, sistemas de caminos, particiones de superficies o sistemas de ocupación y de conexión¹⁷⁶.

¹⁷³ Véase HOLLAND, J.: *Emergence from Chaos to Order*. Oxford University Press, 1998. Citado en HENSEL, M. et al. (ed.), op. cit., pág 8.

¹⁷⁴ Véase HEYLIGHEN, F.: "Self-Organisation, Emergence and the Architecture of Complexity", en *Proceedings of the 1st European Conference on System Science*. Paris. Citado en HENSEL, M. et al. (ed.), op. cit., pág 9.

¹⁷⁵ Véase la tesis de Eda Schaur, colaboradora del Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart, sobre asentamientos no planificados, dirigida por Frei Otto y publicada como el volumen 39 de la serie *Mitteilungen des IL*, SCHAUR, Eda: *Ungeplante Siedlungen / Non-planned settlements*. Krämer. Stuttgart, 1992. (IL 39).

¹⁷⁶ Véase OTTO, Frei: *Besetzen und Verbinden*. Inst. f. leichte Flächentragwerke. Stuttgart, 1995. (Vol. 49 y 50 de la serie *Konzepte des SFB 230*).

Tal como hemos indicado anteriormente, el estudio y la observación de la naturaleza es actualmente uno de los temas que más atrae la atención de Frei Otto, como demuestra el tema del libro en el que está actualmente trabajando, titulado "Las redes en los seres vivos", y en repetidas ocasiones ha manifestado también la importancia que le concede al conocimiento de la naturaleza como clave para nuestro tiempo y como tarea para la arquitectura del futuro¹⁷⁷. Como hemos visto también, no se trata de una preocupación reciente, que pudiera venir influenciada por modas más o menos actuales como la del ecologismo. Ha sido en realidad uno de los temas permanentes de Frei Otto, que ha configurado una metodología, hasta el punto de darle más importancia al método que al resultado final, una actitud de búsqueda, de humildad frente a la naturaleza, de intentar comprenderla en su complejidad, en sus procesos, en las leyes de la génesis y las transformaciones de sus objetos, en definitiva, una aportación de Frei Otto poco conocida que busca una mayor fundamentación de la arquitectura en los fenómenos físicos o naturales, y que contrasta con otras arquitecturas actuales en las que se observa un predominio de la imagen o del efecto visual.

Otro atento observador de la naturaleza, Johann Wolfgang Goethe, gran humanista y hombre universal, con un sentido de la forma y una sensibilidad

¹⁷⁷ Véase OTTO, Frei: "forma e costruzione" en GAZZANIGA, L. (ed.): *Eladio Dieste, Frei Otto*. Skira. Milano, 1998. Pág. 66: "Insisto en que el verdadero núcleo del problema de nuestro tiempo es la naturaleza, entendida como naturaleza animal, vegetal y mineral, pero también como naturaleza humana. Es indispensable una lección de modestia hacia la naturaleza...".

Véase también "Frei Otto in conversation with the Emergence and Design Group", en *Architectural Design*, May./Jun. 2004, op. cit. pág. 25: "Es necesario que nosotros los arquitectos intentemos entender la naturaleza viviente, pero no copiarla. Esta es una tarea muy importante para el futuro". (La traducción de ambos textos es propia).

estética sólidamente educados, sintió igualmente la profunda necesidad de conocer la naturaleza y de indagar en ella las leyes de la forma (*Gestalt*), de las formaciones y transformaciones (*Bildungen und Umbildungen*) de los objetos animados e inanimados, también con un enfoque globalizador y multidisciplinar, abarcando muy distintos campos como la botánica, la zoología, la anatomía, la mineralogía, la geología o la meteorología. Esto lo expresó poéticamente en un poema, publicado en 1820, a título de visión retrospectiva sobre sus estudios morfológicos, y reflejando la necesidad por él expresada de dar impulso a una nueva ciencia, que él denominó "morfología", a modo de una teoría de la forma comparada, que adoptara la forma como principio común unificador y objeto central de su atención tanto en los seres de la naturaleza como en el arte y la ciencia¹⁷⁸:

*Freudig war, vor vielen Jahren,
Eifrig so der Geist bestrebt,
Zu erforschen zu erfahren,
Wie Natur im Schaffen lebt.
Und es ist das ewig Eine,
Das sich vielfach offenbart;
Klein das Große, groß das Kleine,
Alles nach der eignen Art.
Immer wechselnd, fest sich haltend;
Nah und fern und fern und nah;
So gestaltend, umgestaltend –
Zum Erstaunen bin ich da.*

Johann Wolfgang Goethe: *Zur Morphologie*,
Band I Heft 3, 1820

¹⁷⁸ Véase GOETHE, J.W.: "Die Absicht eingeleitet" (1807), en *Zur Morphologie*, Band I Heft I, 1817: "Man findet daher in dem Gange der Kunst, des Wissens und der Wissenschaft mehrere Versuche, eine Lehre zu gründen und auszubilden, welche wir die Morphologie nennen möchten" (Por ello encontramos en el transcurso del arte, del conocimiento y de la ciencia diversos intentos de fundar y formar una disciplina que llamaremos morfología), publicado en edición más reciente en GOETHE, J.W.: *Schriften zur Morphologie II*. Cotta. Stuttgart, [1969]. La traducción es propia.

Tan alegre como asiduo,
esforzóse muchos años
por indagar el espíritu
cómo Natura en sus actos
de creación portarse suele.
Y la clave de ese arcano
es que lo único y eterno
se revela en modo vario;
como pequeño, lo grande;
lo pequeño, como magno;
cada cosa a su manera,
según su estilo adecuado.
Siempre cambiando de forma,
nunca su esencia cambiando;
cercano y remoto a un tiempo,
próximo a un tiempo y lejano;
siempre formándose y siempre
transformándose... de un modo
que ya pasar de ahí no puedo,
pues me paraliza el pasmo.

Johann Wolfgang Goethe: *Zur Morphologie*,
Band I Heft 3, 1820

(Traducción de Rafael Cansinos Asséns, publicada en GOETHE, J.W.: *Obras completas*. Tomo I. Miscelánea. Teoría de los colores. Poesía. Novela. Aguilar. Madrid, 1957. Pág. 1050.)

IX. Bibliografía

IX.1. Sobre la relación entre forma y estructura.

ADDIS, Bill: *The Art of the Structural Engineer*. Artemis. Londres, 1994.

- *Creativity and Innovation. The Structural Engineer's Contribution to Design*. Architectural Press. Oxford, 2001.

AGUILÓ, Miguel; MANTEROLA, Javier; ONZAIN, Mario; RUI-WAMBA, Javier: *Javier Manterola Armisén. Pensamiento y obra*. Fundación Esteyco. Madrid, 2004.

ARUP, Ove: "The Engineer and the Architect", en *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, vol. 13, 1958-59, pp. 510-532.

BERGER, Horst: *Light Structures, Structures of Light*. Birkhäuser. Basel, 1996.

BILLINGTON, David P.: *The Tower and the Bridge*. Princeton University Press. Princeton, 1985.

CALATRAVA, Santiago: "The synthetic power of games and metaphor", en *Building Arts Forum: Bridging the Gap. Rethinking the Relationship of Architect and Engineer*. Van Nostrand Reinhold. New York, 1991.

CANDELA, Félix: *En defensa del formalismo y otros escritos*. Xarait. Madrid, 1985.

CARDELLACH, Félix: *Filosofía de las estructuras*. Editores técnicos asociados. Barcelona, 1970 (1910).

DIESTE, Eladio: "Introducción", "Arquitectura y construcción" y "La conciencia de la forma", en *Eladio Dieste. 1943-1996*. Junta de Andalucía. Sevilla, 1996.

- "Estética y diseño en ingeniería", en *Obra Pública* nº 7/8. 1988.

ENGEL, Heino: *Sistemas de estructuras*. Gustavo Gili. Barcelona, 2001 (1997).

FERNÁNDEZ CASADO, Carlos: *La arquitectura del ingeniero*. Alfaguara. Madrid, 1975.

- *Estética de las artes del ingeniero*. Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. Madrid, 1976

FERNÁNDEZ ORDÓÑEZ, José Antonio: *El pensamiento estético de los ingenieros. Funcionalidad y belleza*. Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. Madrid, 1990.

FREYSSINET, Eugène: *Un amour sans limite*. Linteau. Paris, 1993.

GORDON, James Edward: *Estructuras o por qué las cosas no se caen*. Celeste. Madrid, 1999.

HOLGATE, Alan: *The Art of Structural Engineering: The Work of Jörg Schlaich and his Team*. Axel Menges. Stuttgart, 1997.

LE RICOLAIS, Robert: *Structures Implicit and Explicit*. University of Pennsylvania. Philadelphia, 1973.

LEONHARDT, Fritz: *Puentes. Estética y Diseño*. Presses polytechniques romandes. Lausanne, 1986.

MAILLART, Robert: “*Gestaltung des Eisenbetons*”, y “*Zur Berechnung des Eisenbetons*” (1938).

- “*Masse oder Qualität im Betonbau?*” (1931).
- “*Die Wandlung in der Baukonstruktion seit 1883*” (1932).

publicados en Max BILL: *Robert Maillart*. Verlag für Architektur. Zürich, 1949.

MAINSTONE, Rowland J.: *Developments in Structural Form*. Architectural Press. Oxford, 1998.

MANTEROLA, Javier: “*La Estructura resistente en la arquitectura actual*”, en *Informes de la Construcción* nº 456-457. Jul-Oct. 1998.

- “*Arquitectos-ingenieros. El futuro de los puentes*”, en *Revista de Obras Públicas* nº 3.366 junio 1997.
- “*La estructura ya no es lo que era*”, en *Quaderns* nº 171. Oct.-Dic. 1986.

MIMRAM, Marc: *Structures et formes. Étude appliquée à l'oeuvre de Robert le Ricolais*. Dunod. Paris, 1983.

MORANDI, Riccardo: prólogo, en BOAGA, G.; BONI, B.: *Riccardo Morandi*. Edizioni di Comunità. Milán, 1962.

NERVI, Pier Luigi: *Aesthetics and Technology in Building*. Harvard University Press. Cambridge, Massachusetts, 1965.

OTTO, Frei: *Structures. Form, force, mass*. IL. Stuttgart, 1992.

OTTO, Frei; RASCH, Bodo: *Finding form*. Axel Menges. Munich, 1995.

PÉREZ ARROYO, Salvador: "Frei Otto: tipología constructiva", en *RC Resúmenes de Construcción* nº2. 1998.

RICE, Peter: *An Engineer Imagines*. Artemis. Londres, 1994.

ROBBIN, Tony: *Engineering a New Architecture*. Yale University Press. New Haven, 1996.

RUI-WAMBA, Javier: *Aforismos estructurales*. Fundación Esteyco. Madrid, 1998.

SALVADORI, Mario; HELLER, Robert: *Estructuras para arquitectos*. CP 67. Buenos Aires, 1994 (1963).

SALVADORI, Mario: *Why Buildings Stand Up. The Strength of Architecture*. W.W. Norton. Londres, 1990 (1980).

- *The art of construction: projects and principles for beginning engineers and architects*. Chicago Review Press. Chicago, 1990 (1979).

SCHLAICH, Jörg: *“Zur Gestaltung der Ingenieurbauten oder Die Baukunst ist unteilbar”*, en *Der Bauingenieur*. 02 / 86.

- *“Practices which integrate architecture and engineering”*, en *Building Arts Forum: Bridging the Gap. Rethinking the Relationship of Architect and Engineer*. Van Nostrand Reinhold. New York, 1991.
- *“The Engineer and Aesthetics”*, en *Introduction paper. XI FIP-Congress*. Hamburgo. 06 / 90.
- *“Les structures légères”*, en *Annales de l'I.T.B.T.P.* n° 479. Diciembre 1989.

SCHLAICH, Jörg et al.: *Leicht weit – Light Structures, Jörg Schlaich Rudolf Bergemann*. Prestel. Munich, 2003.

TORROJA, Eduardo: *Razón y ser de los tipos estructurales*. CSIC. Madrid, 1996 (1957).

- *“Las formas laminares”* (1957), en FERNÁNDEZ ORDÓÑEZ, J.A., et al.: *La modernidad en la obra de Eduardo Torroja*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 1979.

IX.2. Frei Otto como autor o editor de libros.

Das hängende Dach : Gestalt und Struktur. Bauwelt-Verl. Berlin, 1954. (Traducción castellana: *Cubiertas colgantes.* Labor. Barcelona, 1958.)

Zugbeanspruchte Konstruktionen : Gestalt, Struktur und Berechnung von Bauten aus Seilen, Netzen und Membranen. Volumen I. Ullstein. Frankfurt; Berlin, 1962.

Zugbeanspruchte Konstruktionen : Gestalt, Struktur und Berechnung von Bauten aus Seilen, Netzen und Membranen. Volumen II. Ullstein. Frankfurt; Berlin, 1966.

Natürliche Konstruktionen: Formen und Strukturen in Natur und Technik und Prozesse ihrer Entstehung. Deutsche Verlags-Anstalt. Stuttgart, 1982.

Selbstbildung: physikalische und konstruktive Entscheidungsprozesse in Architektur und Natur. Inst. f. leichte Flächentragwerke, 1984. (Konzepte SFB 230 ; nº 2).

Form: ein Vorschlag zur Entwicklung einer Methode zur Ordnung u. Beschreibung von Formen / Form. Krämer. Stuttgart, 1988. (IL 22).

Gestaltwerdung : zur Formentstehung in Natur, Technik und Baukunst. R. Müller. Köln, 1988. (Arcus ; 4).

Die natürliche Konstruktion gewachsener Siedlungen.
Inst. f. leichte Flächentragwerke. Stuttgart, 1991.
(Konzepte SFB 230; n° 37).

*Konstruktion: ein Vorschlag zur Ordnung und
Beschreibung von Konstruktionen / Structure.*
Krämer. Stuttgart, 1992. (IL 23).

*Alte Baumeister : was könnten die alten Baumeister
erfunden haben? / Ancient architects.* Krämer.
Stuttgart, 1994. (IL 37).

Pneu und Knochen / Pneu and bone. Inst. f. leichte
Flächentragwerke. Stuttgart, 1995. (IL 35).

Verzweigungen. Inst. f. leichte Flächentragwerke.
Stuttgart, 1995. (Konzepte SFB 230; n° 46).

*Die gekammerten oder verspannten flüssigkeitsgefüll-
ten Pneus.* Inst. f. leichte Flächentragwerke.
Stuttgart, 1995. (Konzepte SFB 230; n° 47).

Besetzen und Verbinden: Prozesse des Besetzens.
Volumen 1. Inst. f. leichte Flächentragwerke.
Stuttgart, 1995. (Konzepte SFB 230; n° 49).

Besetzen und Verbinden: Prozesse des Verbindens.
Volumen 2 Inst. f. leichte Flächentragwerke.
Stuttgart, 1995. (Konzepte SFB 230; n° 50).

Prinzip Leichtbau / Lightweight Principle.
Krämer. Stuttgart, 1998. (IL 24)

IX.3. Monografías sobre Frei Otto.

ROLAND, Conrad: *Frei Otto – Spannweiten: Ideen und Versuche zum Leichtbau*. Ullstein. Berlin, 1965. (Traducción castellana: *Frei Otto - Estructuras: Estudios y trabajos sobre la construcción ligera*. Gustavo Gili. Barcelona, 1973.)

GLAESER, Ludwig: *The work of Frei Otto*. Museum of Modern Art. New York, N.Y., 1972.

DREW, Philip: *Frei Otto: Form and Structure*. Crosby Lockwood Staples. London, 1976.

GLAESER, Ludwig: *The work of Frei Otto and his teams 1955 – 1976*. Institut für leichte Flächentragwerke. Stuttgart, 1978. (IL 17).

BURKHARDT, Berthold (ed.): *Schriften und Reden: 1951 – 1983 / Frei Otto*. Vieweg. Braunschweig, 1984.

TEAGUE, Edward H.: *Frei Otto: bibliography and building list*. Vance Bibliographies. Monticello, Ill. , 1985.

WILHELM, Karin: *Portrait Frei Otto*. Quadriga-Verlag Severin. Berlin, 1985. (Architekten heute ; 2).

SCHNEIDER, J. Martina (ed.): *Der umgekehrte Weg: Frei Otto zum 65. Geburtstag*. Müller. Köln, 1990. (Arcus ; 10).

YUROUKOV, Ilya; KRAICHKOVA, Edith (comp.): *Frei Otto*. Arterigere. Varese, 1991.

SCHANZ, Sabine (ed.): *Frei Otto, Bodo Rasch: Finding Form. Towards an Architecture of the Minimal.* Axel Menges. 1995.

GAZZANIGA, Luca: *Eladio Dieste, Frei Otto : esperienze di architettura: generazioni a confronto.* Skira. Milano, 1998.

OSSOWSKI, Christina (ed.): *Geplante Poesie : ausgewählte Arbeiten von Frei Otto und seinen Teams, 1955 – 2000.* Stadt Leonberg. Leonberg, 2001.

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB: *Architekten - Frei Otto.* Fraunhofer IRB-Verlag. Stuttgart, 2004.

IX.4. Publicaciones del “Entwicklungsstätte für den Leichtbau” (EL, Centro para el desarrollo de la construcción ligera) de Berlín. Serie *Mitteilungen* (informes), editada por Frei Otto.

- Mitteilung 1. *Das Programm*. Berlín, 1958.
- Mitteilung 2. *Bauwerke mit senkrechten Bögen, die Seilnetze oder Membranen tragen und durch diese abgespannt werden*. Frei OTTO con Ewald BUBNER. Berlín, 1958.
- Mitteilung 3. *Das Eingangsdach für die Bundesgartenschau in Köln 1957*. Berlín, 1958.
- Mitteilung 4. *Zugverankerungen im Baugrund*. Frei OTTO con Ewald BUBNER. Berlín, 1958.
- Mitteilung 5. *Die Bauten auf der Weltausstellung in Brüssel*. Berlín, 1958.
- Mitteilung 6. *Anpassungsfähiges Bauen*. Frei OTTO con W. ADLER, E. BUBNER, K.H. BUBNER, H. DENOT, R. DOERNACH, G. EMMERICH, Y. FREIDMAN, A. HERREY, W. JORDAN, R. LINDNER, H. LOOSER, S. LOHS, J. OTTO, S. RADTKE, J. TRAPMAN. Berlín, 1959.
- Mitteilung 7. *Membranen mit hohen und niedrigen Punkten*. Frei OTTO con John KOCH. Berlín, 1961.

- Mitteilung 8. *Zugbeanspruchte Konstruktionen für mehrgeschossiges Bauwerke*. Frei OTTO con Conrad ROLAND. Berlín, 1962.
- Mitteilung 9. *Gedanken zum Einsatz von Kunststoffen für vielgestaltige Bauten*. Berlín, 1963.

IX.5. Publicaciones del “Institut für leichte Flächentragwerke” (IL, Instituto de Estructuras Ligeras) de Stuttgart. Serie “Mitteilungen des IL” (Informes del IL).

- IL 1. *Minimalnetzen / Minimal Nets*. Berthold BURKHARDT (ed.). Krämer. Stuttgart, 1969.
- IL 2. *Stadt in der Arktis / City in the Arctic*. Krämer. Stuttgart, 1971.
- IL 3. *Biologie und Bauen 1 / Biology and Building 1*. Universität Stuttgart. Stuttgart, 1971.
- IL 4. *Biologie und Bauen 2 / Biology and Building 2*. Universität Stuttgart. Stuttgart, 1972.
- IL 5. *Wandelbare Dächer / Convertible Roofs*. Krämer. Stuttgart, 1972.
- IL 6. *Biologie und Bauen 3 / Biology and Building 3*. Krämer. Stuttgart, 1973.
- IL 7. *Schatten in der Wüste / Shadow in the Desert*. Inst. für Leichte Flächentragwerke. Stuttgart, 1972.
- IL 8. *Netze in Natur und Technik / Nets in Nature and Technics*. Inst. für Leichte Flächentragwerke. Stuttgart, 1975.

- IL 9. *Pneus in Natur und Technik / Pneus in Nature and Technics*. Inst. für Leichte Flächentragwerke. Stuttgart, 1977.
- IL 10. *Gitterschalen / Grid Shells*. Inst. für Leichte Flächentragwerke. Stuttgart, 1974.
- IL 11. *Leichtbau und Energietechnik / Lightweight and Energy Technics*. Krämer. Stuttgart, 1978.
- IL 12. *Wandelbare Pneus / Convertible Pneus*. Institut für Leichte Flächentragwerke. Stuttgart, 1975.
- IL 13. *Multihalle Mannheim / Multi Hall Mannheim*. Krämer. Stuttgart, 1978.
- IL 14. *Anpassungsfähig Bauen / Adaptable Architecture*. Stuttgart : IL, 1975.
(Traducción castellana: *Arquitectura adaptable*. Gustavo Gili. Barcelona, 1979.)
- IL 15. *Lufthallenhandbuch / Air Hall Handbook*. Krämer. Stuttgart, 1983.
- IL 16. *Zelte / Tents*. Krämer. Stuttgart, 1976.
- IL 17. *The work of Frei Otto and his teams 1955 – 1976*. Ludwig GLAESER (ed.). Institut für leichte Flächentragwerke. Stuttgart, 1978.
- IL 18. *Seifenblasen / Forming Bubbles*. Krämer. Stuttgart, 1988.

- IL 19. *Wachsende und sich teilende Pneus / Growing and Dividing Pneus*. Krämer. Stuttgart, 1979.
- IL 20. *Aufgaben: Probleme und Fragen in Forschung, Entwicklung und Anwendung des Leichtbaus / Tasks*. Krämer. Stuttgart, 1979.
- IL 21. *Grundlagen / Basics*. Krämer. Stuttgart, 1979. (Form, Kraft, Masse 1 / Form, Force, Mass 1).
- IL 22. *Form: ein Vorschlag zur Entwicklung einer Methode zur Ordnung und Beschreibung von Formen / Form*. Frei OTTO. Krämer. Stuttgart, 1988. (Form, Kraft, Masse 2 / Form, Force, Mass 2).
- IL 23. *Konstruktion: ein Vorschlag zur Ordnung und Beschreibung von Konstruktionen / Structure*. Frei OTTO. Krämer. Stuttgart, 1992. (Form, Kraft, Masse 3 / Form, Force, Mass 3).
- IL 24. *Prinzip Leichtbau / Lightweight principle*. Krämer. Stuttgart, 1998. (Form, Kraft, Masse 4 / Form, Force, Mass 4).
- IL 25. *Experimente / Experiments*. Siegfried GASS. Krämer. Stuttgart, 1990. (Form, Kraft, Masse 5 / Form, Force, Mass 5).
- IL 26. *Internationaler Jugendwettbewerb Natur und Bauen / International youth competition nature and architecture*. Berthold BURKHARDT (ed.). Krämer. Stuttgart, 1980.

- IL 27. *Natürlich bauen / Natural building*. Krämer. Stuttgart, 1981.
- IL 28. *Schalen in Natur und Technik / Shells in nature and technics*. Krämer. Stuttgart, 1985. (Diatomeen 1)
- IL 29. *Die Zeltstädte des Hadsch / The tent cities of the Hajj*. Bodo RASCH. Institut für leichte Flächentragwerke. Stuttgart, 1980.
- IL 30. *Schattenzelte, sun and shade, toldos, vela*. Krämer. Stuttgart, 1984.
- IL 31. *Bambus / Bamboo*. Universität Stuttgart. Stuttgart, 1985.
- IL 32. *Leichtbau in Architektur und Natur / Lightweight in Architecture and Nature*. Krämer. Stuttgart, 1983.
- IL 33. *Radiolarien: Schalen in Natur und Technik II / Radiolaria: Shells in Nature and Technics II*. Krämer. Stuttgart, 1990.
- IL 34. *Das Modell: Antoni Gaudis Hängemodell und seine Rekonstruktion; neue Erkenntnisse zum Entwurf für die Kirche der Colonia Güell / The model: Antoni Gaudí's hanging model and its reconstruction. New light on the design of the church of the Colonia Güell*. Jos TOMLOW. Krämer. Stuttgart, 1989.

- IL 35. *Pneu und Knochen / Pneu and bone*. Frei OTTO. Institut für leichte Flächentragwerke. Stuttgart, 1995.
- IL 36. *Subjektive Standorte in Baukunst und Naturwissenschaft / Subjective standpoints in architecture and science*. Krämer. Stuttgart, 1984.
- IL 37. *Alte Baumeister: was könnten die alten Baumeister erfunden haben? / Ancient architects: what could the ancient master builders have invented?*. Frei OTTO. Krämer. Stuttgart, 1994.
- IL 38. *Diatomeen 2 / Diatoms 2*. Stuttgart, 1995.
- IL 39. *Ungeplante Siedlungen: charakteristische Merkmale - Wegesystem, Flächenteilung / Non-planned settlements: characteristic features – path systems. Surface subdivisions*. Eda SCHAUR. Krämer. Stuttgart, 1992.
- IL 41. *Intelligent bauen: Aspekte einer anderen Baukultur / Building with intelligence: Aspects of a different building culture*. Eda SCHAUR (ed.). Krämer. Stuttgart, 1995.

X. Apéndice documental

X.1 Entrevista mantenida con Frei Otto el 7 de Junio de 2004 en su taller-estudio de Warmbronn (Stuttgart, Alemania).

Traducción propia de la versión original en alemán.



J. M. Songel: De toda la vasta y rica variedad de aspectos y posibilidades de análisis que ofrecen su obra y su pensamiento, en mi tesis doctoral he querido centrarme en las dimensiones sistematizadora, experimental y metodológica de su trabajo. La historiografía clásica de la arquitectura moderna (Benevolo, Frampton, etc.) tiende a situar su obra en el contexto de las arquitecturas con mayor énfasis en la tecnología, llegando a vincularla con los inicios del *high tech*. En mi tesis he considerado su aportación histórica más bien en relación con la tradición de los ingenieros pioneros en la búsqueda de la forma resistente con nuevos materiales y su reflexión sobre la relación entre la forma y lo resistente, así como en relación con los planteamientos racionalizadores de los orígenes de la arquitectura moderna durante los años veinte.

Es bien sabido que usted ha tenido una estrecha y fructífera relación con ingenieros como Fred Severud, Ove Arup o Ted Happold. ¿Puede hablarme de esta relación? ¿Qué influencias ha podido producir?

Frei Otto: Una relación realmente muy importante fue con un ingeniero alemán, Fritz Leonhardt, casi podríamos decir que el inventor de las torres de televisión, y constructor de puentes, con el que he realizado muchos trabajos. Ya entre 1952 y 1953 comenzó mi relación con Fritz Leonhardt. Después vino la relación con Ove Arup, y más tarde con Ted Happold.

J. M. Songel: ¿Cómo conoció a estos ingenieros, cómo se inició su relación con ellos?

Frei Otto: Bueno, en realidad de un modo muy sencillo: surge un proyecto, surgen problemas y se establecen contactos. Arup con relación a nuestro primer proyecto en Arabia Saudí, en 1965. Al mismo tiempo con Ted Happold, que entonces era uno de los directores del departamento *Structures Three*, de la oficina de Ove Arup. Y esta relación ha permanecido a lo largo del tiempo, de modo que todavía hoy trabajo en colaboración con los tres equipos, aunque han fallecido ya mis más estrechos amigos Arup, Happold y Leonhardt.

J. M. Songel: ¿Qué obra o qué ocasión originó los inicios de su relación con Leonhardt?

Frei Otto: Esa es una historia muy peculiar. Yo había estudiado en Berlín, y cuando escribí mi tesis doctoral ya había realizado algunas publicaciones. Un arquitecto de Karlsruhe, Schelling, a raíz de uno de

mis artículos publicado en la revista *Bauwelt* ganó el concurso para la Sala de la Selva Negra (*Schwarzwaldhalle*) en Karlsruhe. Entonces él me escribió preguntándome si podía ayudarlo, porque me consideraba un especialista, y mi profesor de estructuras y director de mi tesis, Helmut Bickenbach, me aconsejó que me pusiera en contacto con Fritz Leonhardt. La obra finalmente no la llevamos a cabo, ya que intervino otro ingeniero, Ulrich Finsterwalder. Y así la Sala de la Selva Negra de Karlsruhe surgió en realidad a partir de mi trabajo, es decir a partir de las arenas de Raleigh, y fue construida antes de que ésta se construyese. Es decir que la imitación fue en realidad anterior al producto original. Una situación muy peculiar.

De este modo conocí entonces a Fritz Leonhardt. Y como entonces después de mi tesis doctoral estuve también colaborando con la empresa de construcción de carpas Stromeyer, le pedí que me ayudara con algunas construcciones de carpas, en particular para la exposición de jardinería de 1957 en Colonia, con la tarea más difícil, el arco de entrada. Y desde entonces ha habido una y otra vez diferentes proyectos con Fritz Leonhardt, tal como dije anteriormente.

Después vinieron los proyectos para Arabia, para los que los ingleses estaban mejor predestinados, porque habían mantenido siempre una relación con aquel país. Algo muy lógico si tenemos en cuenta las circunstancias históricas. Como Leonhardt no quería y tampoco se veía tan idóneo para trabajar en Arabia, realizamos estos trabajos con los ingleses. Este es pues el origen de las relaciones con los ingenieros.

Con Torroja mantuve tan sólo una relación epistolar. Él estudió mucho mis trabajos, y me invitó a un seminario que tuvo lugar en París, creo que en 1954. Pero él no vino al seminario, murió antes. Así que no conocí a Torroja, nunca me encontré con él. Había un encuentro concertado, pero como dije, él murió antes. Por supuesto he leído su famoso libro "Razón y ser de los tipos estructurales", en alemán.

J. M. Songel: Él había fundado también la "*International Association for Shell Structures*", ¿Ha tenido usted también relación con esta asociación?

Frei Otto: Relación sí, pero no fui miembro. Porque inicialmente me ocupé principalmente de las membranas y la asociación sólo mucho más tarde pasó a ocuparse también de las membranas, y no sólo de las estructuras laminares o cáscaras. Entonces se decía que las membranas también eran cáscaras, a lo que respondí que esto no era cierto, las cáscaras son cáscaras y las membranas son membranas, son dos cosas distintas. Pero en fin, estas discusiones sobre palabras siempre fueron una gran diversión. No las podemos tomar muy en serio.

J. M. Songel: ¿Y con relación a Freyssinet?

Frei Otto: Tampoco lo conocí. Hubo un intercambio epistolar, particularmente entre Leonhardt y Freyssinet. Naturalmente he estudiado a Freyssinet, y demás, y también tuve un intercambio epistolar mucho más intensivo con Bernard Laffaille, que había construido ya sus primeras láminas de chapa y cubiertas colgantes. Luego vino aquel terrible revés que tuvo con la gran cáscara de la emisora Europa N° 1 en Luxemburgo, que le arruinó. Creo que nunca



231

Fig. 231. Frei Otto con Félix Candela. Fuente: Archivo IL, Diap. N° 3.7.161.

llegó a recuperarse anímica ni psíquicamente. Ahora me ha escrito uno de sus descendientes, de sus hijos. Hay todavía algunas personas que reavivan estas relaciones, pero no fueron tan intensas como podría suponerse. En mi tesis doctoral ya hice alusión a sus primeros trabajos.

J. M. Songel: ¿Con respecto a Le Ricolais?

Frei Otto: Con Le Ricolais sí que tuve un encuentro, es decir, lo conocí personalmente. Fue en Philadelphia con Louis Kahn, cuando estuve dando unos cursos en América. Yo conocía sus trabajos y creo que discretamente nos hemos beneficiado mutuamente en cierta medida, pero eso es todo. No ha habido tanto en esto.

Muy distinto fue el intercambio, muy intenso, con Félix Candela, a quien yo conocía personalmente desde 1958. Yo fui entonces a Méjico. Él me enseñó todos sus trabajos. También mi propia familia mejicana, mi primo, colaboró con Candela en una iglesia. E incluso catorce días antes de la muerte de

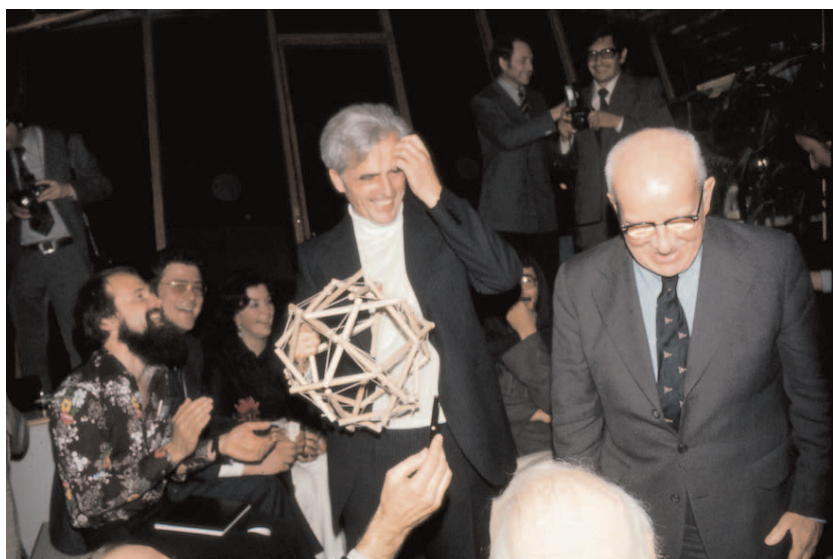
Félix Candela me llamó para vernos en París, en la exposición *L'art de l'ingénieur*. Pero ni él ni yo fuimos, no llegué por tanto a ver esa exposición. Él se había fracturado el cuello del fémur y ya se encontraba en muy mal estado cuando me llamó. Pero con él me encontré con mucha más frecuencia, él estaba a menudo en mi Instituto (fig. 231), y también aquí. Es decir, que con Félix Candela hubo un buen intercambio. Él tuvo sus dificultades, no tenía encargos, no pudo volver al ejercicio de la profesión. Intenté ayudarle, pero no pude, ya que tampoco tenía yo trabajo. Esto por lo que respecta a Félix Candela, que era un auténtico español y al que la guerra civil le había obligado a salir de su país. Nos encontramos una vez en Madrid y en un largo paseo me mostró los lugares vinculados a su biografía, donde él se había criado.

J. M. Songel: ¿Con relación a Nervi?

Frei Otto: No llegué a encontrarme nunca con Nervi. Por supuesto que conocí sus trabajos. Fui también en varias ocasiones, digamos que competidor de Nervi. Particularmente en una invitación para la "sportcity" (ciudad deportiva) en Kuwait. Para este concurso fuimos invitados Nervi, Candela y nosotros, es decir, el equipo que formaba yo con Kenzo Tange. Los trabajos los realizamos en Tokio, y llegamos a ganar el concurso. Aquella fue la única vez que competí con Nervi. No intencionadamente, yo tengo a Nervi en muy alta estima. Pero cuando se es invitado, uno, siendo joven, intenta superar incluso a una autoridad como él, cosa que finalmente logramos. Por supuesto que las construcciones de Nervi son cimas destacadas.



Fig. 232. Frei Otto con Buckminster Fuller. Fuente: Archivo IL, Diap. N° 3.7.159 y 3.7.160.



232

Todavía falta otro: Richard Buckminster Fuller. Naturalmente conocía sus trabajos. Nos encontramos por primera vez en St. Louis en 1958, cuando yo era profesor en la *Washington University* de aquella ciudad, y después en Carbondale en la *University of Illinois*, y tuvimos una larga conversación, e incluso en parte también una viva discusión en el sentido más amistoso, sobre el tema de las construcciones de grandes luces, en especial las de bóvedas o cáscaras de celosía. Después estuvo Fuller más a menudo en Alemania, también en mi instituto (fig. 232), y le inicié también en la relación con la biología, en particular con la biología ordinaria y el profesor Gerhard

Helmcke de la Universidad Técnica de Berlín. Él vio los trabajos de Helmcke, especialmente las imágenes estereomicroscópicas de diatomeas y radiolarias. Fue entonces cuando se levantó y quería agarrar las estereofotos, se había quedado pasmado cuando vio que la naturaleza viviente era más rápida que él en invenciones. En cierto modo fue muy gracioso, no se puede tomar la cosa tampoco siempre muy en serio.

Pero la relación con Buckminster Fuller abrió los ojos a muchas personas y fue sumamente importante. Y estoy también ahora escribiendo un libro en el que trato este tema en detalle. Todavía no está en el mercado.

J. M. Songel: ¿Tiene ya título este libro?

Frei Otto: Sí, se titula "La red". Quizás aparezca el año próximo. El título es "La red en los seres vivos". También se podría decir "La red en la naturaleza viviente". Pero sólo uno de los capítulos tiene que ver con Buckminster Fuller. Por lo demás tiene que ver más con los trabajos de los biólogos alemanes Helmcke, Ulrich Kull, de Stuttgart, y Adolf Seilacher, de Tübingen. Esta relación de aquel programa de investigación 230 que perduró más de quince años hasta 1991 ó 1995. Hoy ya no existe. También el señor Kull está ya jubilado. De modo que toda esta línea de investigación y de desarrollo ya no existe.

J. M. Songel: Terminó oficialmente en 1995, ¿no es así?

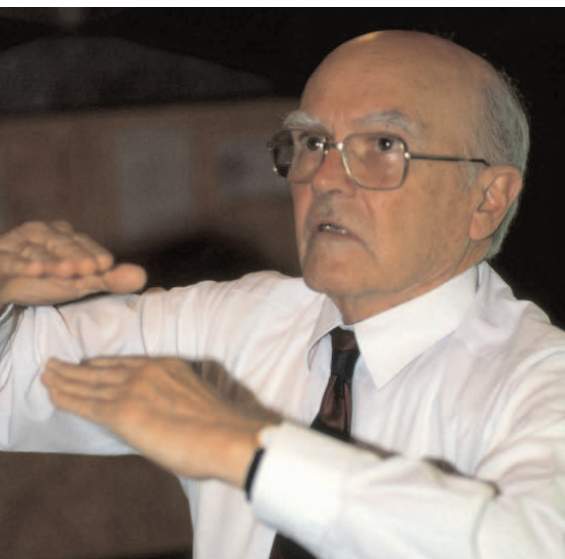
Frei Otto: Sí, oficialmente. Pero en realidad ya con mi jubilación en 1991. También mi antiguo instituto está ahora en otras manos y tiene ya otra denominación.

J. M. Songel: ¿Podría hablarme un poco más acerca de sus próximas publicaciones?

Frei Otto: Hay otro libro que está en proceso de publicación en la editorial Axel Menges sobre el tema "ocupar y conectar". La editorial tiene el manuscrito, pero yo no he autorizado todavía su publicación, esto debe ocurrir en el transcurso del otoño. El libro trata de sistemas topográficos, de las conexiones, es decir sistemas de carreteras, de líneas de ferrocarril, pero también de sistemas de fuerzas o de energía, es decir, redes de caminos de fuerza, y redes de caminos normales. De algún modo también o concentrada la tesis doctoral de Eda Schaur, que fue publicada como el tomo IL 39 de la serie *Mitteilungen des IL* con el título "Asentamientos no planificados". Se trata pues de cómo se desarrollan las redes de caminos desde un punto de vista meramente energético. Redes de caminos de hombres y animales, pero también de otros sistemas. Los volúmenes 49 y 50 de la serie *Konzepte* son un avance del manuscrito, y fueron realizados como preparación para el libro.

J. M. Songel: Y también el libro titulado "Ramificaciones", creo que el número cuarenta de la serie *Mitteilungen*.

Frei Otto: Tiene usted razón. En realidad este libro quería y debería elaborarlo uno de mis colaboradores, Jürgen Hennicke, que todavía está en mi instituto, pero desafortunadamente no ha terminado todavía con este trabajo. En este tema ha trabajado también un mejicano de nombre Montero, creo que de la Universidad de Méjico. Desgraciadamente este tema no se ha concluido todavía, y yo tampoco tuve las energías necesarias para concluirlo, porque me había ocupado más de los temas biológicos.



233

J. M. Songel: Entonces ahora trabaja usted más en la publicación del libro titulado “la red”.

Frei Otto: Sí, es el próximo libro que pensamos publicar, justamente como decía el de “ocupar y conectar”, es decir, redes de caminos. Mientras que “las redes”, en el que trabajo ahora, trata de las redes en los seres vivos, en la naturaleza viviente.

J. M. Songel: ¿Conoció a Eladio Dieste?

Frei Otto: Desgraciadamente nunca me encontré con él. En una ocasión llegó incluso a estar previsto que hablaríamos conjuntamente en un acto, en la nueva universidad de habla italiana en el sur de Suiza, en Lugano. Había incluso una publicación conjunta, pero como dije no llegué a encontrarme nunca con Dieste. Sí que llegué a recibir de él un libro como regalo. Sus trabajos me parecen magníficos, con sumo gusto me habría encontrado con él.

Fig. 233. Eladio Dieste en el IL.
Fuente: Archivo IL, Diap. N°
3.30.76 y 3.30.82.

J. M. Songel: Dieste ha sido conocido aquí en Europa bastante tardíamente.

Frei Otto: Sí, es cierto. En mi opinión no es suficientemente conocido. Pero uno de mis antiguos estudiantes, que hoy es catedrático en la Universidad Técnica de Munich, Rainer Barthel, es un buen conocedor de Dieste y creo que lo está dando a conocer también aquí en Alemania, de manera que este desconocimiento seguramente quedará compensado.

J. M. Songel: Con Heinz Isler ha tenido usted una estrecha relación, ¿no es así?

Frei Otto: Con él me une naturalmente una larga relación. Isler ha recogido muchos de mis desarrollos y ensayos con maquetas, pero los ha aplicado específicamente para la construcción con cáscaras o estructuras laminares de hormigón armado.

J. M. Songel: Él es también un miembro muy activo del grupo de trabajo *Structural Morphology Group* en el seno de la *International Association for Shell and Spatial Structures*.

Frei Otto: Sí, él se ha comprometido mucho ahí.

J. M. Songel: ¿Ha tenido usted algún tipo de relación con este grupo? ¿Qué le parece su actividad?

Frei Otto: Fritz Leonhardt, Jörg Schlaich e Isler fueron efectivamente muy activos en este grupo. Yo también lo habría sido gustosamente, si el grupo me hubiera invitado. Pero por otro lado estaba también muy contento de que no me haya invitado, porque estas cosas generan trabajo. Pero con estos colegas he tenido debates, y en qué medida han podido beneficiar estos debates al trabajo de la IASS, no puedo juzgarlo. De cualquier modo ha sido una

importante organización y quizás se deba a mi dejadez o a mi pereza el no haber participado en ella más activamente. Yo tenía ya bastante tarea con sacar adelante a mi propio instituto.

J. M. Songel: Quizás podríamos abordar ahora la vinculación con los planteamientos racionalizadores de la arquitectura alemana de los años veinte. Su padre era miembro del *Deutscher Werkbund*. Nombres como el de Gropius o Mendelsohn sonaban en el taller de su padre.

Frei Otto: Sí, sí, efectivamente, porque él era un hombre activo en el *Werkbund* y conocía también personalmente a Mendelsohn y a otros. Si él conoció personalmente a Gropius, esto ya no puedo confirmarlo. Pero eso entonces no era ningún problema. Se trataba justamente del *Werkbund*, que en 1933, con la llegada al poder de Hitler fue prohibido.

J. M. Songel: ¿Conoció usted personalmente a Gropius?

Frei Otto: Conocí a Gropius, Mies, Frank Lloyd Wright, Erich Mendelsohn y Severud. Hacia este último me dirigió Eero Saarinen. Todo esto sucedió durante el largo viaje de estudios que realicé entre 1950 y 1951 por los Estados Unidos. Y algunas de estas relaciones se han mantenido hasta la muerte de estas personas. Particularmente con respecto a Gropius y Mies. Y fue algo muy hermoso, y también muy importante.

J. M. Songel: ¿De qué modo? ¿Cómo describiría usted la influencia, la importancia de esta relación?

Frei Otto: Pues, por la claridad de las ideas. La claridad del movimiento de la arquitectura moderna era importante. Fui también durante una década o algo más presidente de la sociedad de la *Weißenhofsiedlung* de Stuttgart, esto por un lado. También me involucré en las discusiones internas del *Werkbund* y del CIAM tan pronto como volví del campo de prisioneros de guerra. De este modo me informaron por ejemplo Wassili Luckhardt y Hans Luckhardt, dos pioneros de la arquitectura moderna, muy pormenorizadamente acerca de las luchas y discusiones que se produjeron en Alemania, en las que había dos corrientes, una más en el sentido diríamos de un movimiento verde alemán anticipado, que rayaba en lo fantástico. Usted conoce quizás las raíces de Luckhardt y Poelzig, también de Mendelsohn, que estaban muy lejos de los límites de la modernidad clásica. Esto me ha interesado mucho. Por qué y cómo sucedió que a finales de los años veinte una de las dos tendencias todavía permanecía, y sin embargo esta arquitectura fantástica que he denominado como la "temprana verde" había experimentado un retroceso. Esto fue algo calculado. En realidad también bajo una fuerte influencia del entonces único francés fuerte del movimiento, que era naturalmente Le Corbusier, o más bien un suizo habría que decir, que ocasionó esto. Esto me ha interesado mucho. Posteriormente yo trabajé con el hijo de Hans Poelzig, Peter Poelzig, durante un tiempo en Berlín. Conozco pues estas discusiones de los años veinte, tanto a través de mis padres como también a través de conversaciones mantenidas tan sólo después de la guerra con los miembros pertenecientes a esa generación todavía supervivientes.

J. M. Songel: Hay quizás dos ideas que podríamos relacionar con la arquitectura alemana de los años veinte. Por un lado la metodología experimental de la Bauhaus, el curso preliminar de Josef Albers, la experimentación con papel, el pliegue, la curvatura, la exploración de las relaciones entre forma y material.

Frei Otto: A Albers lo conocí personalmente. Él estaba impartiendo un seminario en la *Yale University* al mismo tiempo que estuve yo allí en 1960. Esto está claro. Pero por otro lado mi vinculación iba más en la dirección de Walter Gropius. Él me visitó en Berlín cuando se estaba construyendo la *Gropiusstadt*. Yo era ya profesor aquí pero vivía todavía en Berlín, así que debió ser entre 1965 y 1966. En aquella visita Gropius afirmó que yo era el único que continuaba trabajando en la línea por él marcada, precisamente porque yo no partía de unos planteamientos formales, sino porque buscaba con experimentos la forma de la arquitectura del futuro. Casi podría decir que Gropius era un apasionado entusiasta de mis trabajos. Yo también de él, pero Walter Gropius estaba muy bien informado de lo que yo estaba haciendo, y vio en ello uno, o quizás incluso el único camino hacia el futuro. Esto me impresionó mucho. Yo no sabía esto antes.

J. M. Songel: Así pues él le consideraba a usted como un auténtico sucesor de su Bauhaus, de su metodología.

Frei Otto: Sí, podríamos decir que un continuador de sus principios fundamentales. Él no quería una arquitectura formal, sino más bien una arquitectura que se fundamentara en las ciencias naturales. Mies era otra cosa. Con Mies van der Rohe me entendí también

muy bien, pero Mies van der Rohe tendía más a buscar la forma mediante la creación, la elaboración o la construcción de la forma. Mies proyectaba formas arquitectónicas. Gropius no buscaba las formas, sino lo esencial, lo sustancial. Esta es la diferencia entre ambos. Los dos naturalmente con un gran éxito, pero también con caminos diferenciados.

Yo tuve una experiencia muy peculiar. Cuando Mies tenía el encargo de construir la galería nacional de Berlín yo estuve en su estudio de Chicago. Mies estaba muy enfermo y sus colaboradores me pidieron que les diera mi opinión, porque Mies aparentemente así se lo había mandado. Y entonces hice algunas observaciones con respecto a un problema que entonces naturalmente sólo se podía ver en los planos y en la maqueta de la galería nacional, y pensé que había que hacer una modificación. Se habían dispuesto para aquel gran tablero tan sólo cuatro soportes en el centro de los bordes de la cubierta, de manera que estas cubiertas tendían a sufrir grandes deformaciones por los bordes libres que quedaban en voladizo. Y entonces propuse disponer al menos dos soportes en cada borde, es decir apoyar la cubierta sobre un total de ocho soportes. Y así permanece en pie hoy todavía. Me encontré con Mies por última vez en Berlín algunas semanas antes de su muerte con ocasión del montaje de esta cubierta. Mies estaba muy satisfecho por esta decisión. Quiere decir por tanto que los dos hemos seguido nuestra propia trayectoria en total sintonía. Por otro lado yo no sabía que iba a fallecer tan poco tiempo después.

Pero la terminación de la galería nacional no llegó a verla. El día de la inauguración vi por última vez a Walter Gropius, que también estuvo allí. Pero

estas son pequeñas anécdotas al margen, que para la historia de la arquitectura en mi opinión son intrascendentes. Pero son interesantes.

J. M. Songel: ¿Se encontró usted con Gropius por primera vez en el largo viaje de estudios que realizó entre 1950 y 1951 en los Estados Unidos?

Frei Otto: Bueno, no directamente. Nos habíamos escrito. Él me prestó ayuda. Yo era entonces estudiante en la *University of Virginia*. Él me escribió cartas de presentación para Richard Neutra y Erich Mendelsohn y así a partir de ahí pude conocer a todas estas personas. Me encontré con él personalmente más tarde en Alemania. Pero yo ya era muy conocido por Walter Gropius desde hacía tiempo, porque él conocía mis trabajos. Yo también estuve en su estudio de América cuando realicé aquel viaje, pero él justamente no estaba allí, de modo que en aquellos tiempos iniciales no llegábamos a coincidir.

J. M. Songel: ¿Cree usted que el conocimiento de la metodología experimental de la Bauhaus ha influido en usted?

Frei Otto: Yo la conocía muy poco. No había estudiado lo que la Bauhaus había hecho, ni tampoco a Itten y Debus, que también procede de este campo. Todo esto lo conocí mucho más tarde. Debo decir que realmente no ha ejercido ninguna influencia. Yo he seguido mi propio camino. También incluso la influencia de Gaudí llegó mucho más tarde, cuando yo ya había hecho investigaciones con maquetas, en el campo de prisioneros de guerra, que se podrían considerar gaudianas, sin

haber conocido todavía a Gaudí. Simplemente a partir de la lógica de que se puede seguir ese camino. En particular en lo referente a la inversión de estructuras traccionadas en comprimidas. Esto en realidad me era ya conocido a través de un amigo del campo de prisioneros de guerra, que como ingeniero de la construcción conocía esta posibilidad de la inversión, es decir la formación de bóvedas mediante la catenaria, algo muy sencillo, que se conoce desde Hooke y otros, particularmente Newton. Es decir, este tipo de inversión. Naturalmente he conocido después a Gaudí y he estudiado con mucho gusto sus trabajos.

J. M. Songel: ¿Recuerda usted todavía el nombre de ese ingeniero de la construcción del campo de prisioneros de guerra?

Frei Otto: Realmente ya no lo recuerdo. Había también otro amigo que debo mencionar. Era Leopold Kuhlmann, pero el nombre del ingeniero de la construcción que estaba en mi grupo de trabajo ya no lo recuerdo. Esto era en realidad sólo una observación. Me esforcé entonces por conocer la representación de diagramas de fuerzas, es decir la estática gráfica. Y cuando uno se ocupa en estas cosas, entonces se da uno cuenta de que existen las mismas formas con la estática gráfica, independientemente de si se trata de estructuras comprimidas, traccionadas o flexionadas. Es sólo el trazado previo. Es decir que el que con la estática gráfica se pueda generar bóvedas, y que éstas sean también idénticas a las formas colgadas, ya me era conocido en el campo de prisioneros de guerra. En concreto desde finales de 1945. El nombre de Gaudí lo oí por primera vez mucho más tarde.

J. M. Songel: En alguna ocasión ha contado usted su experiencia en el taller de su padre, ha mencionado operaciones como empapar un paño en yeso y colgarlo, dejarlo endurecer e invertirlo después.

Frei Otto: Sí, sí, esto lo hacía mi padre, y simplemente formaba parte del trabajo de escultor. Naturalmente fue allí y entonces cuando intenté por primera vez construir estas formas invertidas, y con ellas continué jugando hasta hoy. Es un juguete maravilloso.

J. M. Songel: Otra conexión con los planteamientos racionalizadores de la arquitectura alemana de los años veinte la constituirían los intentos de sistematización. Del mismo modo que Gropius con sus módulos para juegos de construcciones de grandes dimensiones produjo un gran número de combinaciones espaciales posibles, o Alexander Klein con sus tipos de plantas de viviendas, o del mismo modo que Muthesius recalcó la importancia de los tipos como representación de lo esencial o como un cierto planteamiento espiritual, así también aparecen sus croquis de sistematizaciones como un paso adelante en estos planteamientos racionalizadores.

Frei Otto: Naturalmente que he intentado sistematizar, tan sólo para ordenar un poco esta casi infinita abundancia de posibilidades, particularmente cuando empecé a impartir cursos. Con ello empecé en la *Hochschule für Gestaltung* de Ulm. Esa fue mi primera experiencia docente. La primera petición que recibí no la pude aceptar, porque estaba aquí muy ocupado. Se trataba de un puesto en la escuela de arquitectura de Raleigh, en North Carolina, como sucesor de Nowicki, que había sido víctima de un accidente. Después vinieron St. Louis, Yale, Berkeley, MIT,

Harvard. Para todo ello era necesario introducir una cierta sistematización. ¿Cómo si no abordar la docencia de este campo tan vasto?

Es decir, que el compromiso con la docencia exigía una cierta ordenación, pero también abarcando o teniendo en consideración al mismo tiempo tanto la extensión como la concentración, es decir concentrarse en algunos lugares para poder aventurar verdaderos avances hacia el futuro, cosa que siempre me ha interesado más que el hacer historia. El desarrollo de la historia lo he considerado siempre como responsabilidad de mis compañeros que se dedican a la historia. Siempre he tenido en mi instituto al menos un colaborador, asistente o coprofeesor que se ha ocupado de esto. En particular Rainer Graefe, también Eda Schaur, Berthold Burkhardt, que se dedica a esto hasta ahora en Braunschweig, y Jos Tomlow, en Lusacia. Este tema ha estado en buenas manos, todos ellos han trabajado en esto muy seriamente. Yo también he dedicado siempre atención a este tema, pero no he hecho de él mi propio campo de trabajo más intenso. Siempre dije que sólo con la historia no se podía construir el futuro. Es importante aprender de la historia, está claro, pero mi tarea es trabajar para el futuro.

J. M. Songel: Naturalmente el papel de los croquis de sistematizaciones es muy importante no sólo para clasificar y ordenar, sino también para inventar nuevas posibilidades.

Frei Otto: Sí, bueno, porque uno llega a cosas que todavía no habían sido estudiadas a fondo, y entonces se van llenando los huecos. Yo le llamo a esto el "método sistemático de la invención", pero tan sólo

es un método. El proceso según el cual se combina una cosa con otra puede realizarse de un modo muy sistemático. Toda una serie de mis invenciones tienen su origen en esta combinatoria. Pero las cosas verdaderamente importantes no surgieron de allí, sino en gran parte de observaciones fortuitas o casuales realizadas durante los experimentos. Algunos experimentos por cierto planteados de forma totalmente sistemática. Siempre he combinado la experimentación sistemática con la experimentación fortuita o casual, dándole al azar una oportunidad pero también teniendo siempre en consideración una sistematización, de modo que cuando se descubre algo accidentalmente no ser tan tonto como para desecharlo simplemente porque no encaja en la sistematización. Estoy por ello convencido de que un sistemático puro no puede inventar nada realmente.

J. M. Songel: Es necesario por tanto haber desarrollado también esta capacidad de percibir y apreciar suficientemente bien lo que se presenta de forma casual.

Frei Otto: Y estar observando constantemente. Observando las formas de la naturaleza, en primer lugar las de la naturaleza no viviente, y ver lo que en ella sucede. Las formas de la naturaleza viviente son mucho más complicadas, son casi impenetrables, opacas. Yo las he estudiado, pero las formas de la naturaleza no viviente son desde luego más fáciles de conocer.

J. M. Songel: Quisiera abordar ahora los inicios de su metodología experimental, los orígenes de sus principios permanentes: el principio de la construcción ligera, el principio de la inversión antifunicular, el principio

de la generación de la forma a partir de procesos de autoformación. El vuelo sin motor, la construcción de maquetas o su aprendizaje de cantero aparecen como importantes experiencias iniciales.

Frei Otto: Todo eso naturalmente son cosas ya tan antiguas que apenas son todavía reales. Creo que tampoco son tan importantes, porque cada persona sigue un determinado camino en la vida, que no es repetible. Y a quién le puede aprovechar el que reavivemos todo eso. Puede que sea interesante, pero yo creo que no lo es.

J. M. Songel: Quizás fue importante el impulso irrefrenable para inventar y combinar.

Frei Otto: Eso fue siempre una diversión o una obsesión. Tenía que estar siempre inventando, ya desde pequeño, continuamente. Realizaba los inventos más curiosos, que nada tenían que ver con la arquitectura. Cuando era un chiquillo de siete u ocho años inventé los patines de una sola fila de ruedas, y quería construirlos también. Hoy son algo muy común. Es naturalmente algo muy lógico, que está en el aire, pero siempre es una tontería si esto se hace demasiado temprano, antes de que llegue el momento oportuno. Una invención siempre tiene que ser presentada en el momento adecuado, en el lugar adecuado, y ante las personas más adecuadas de nuestro entorno. Si no se dan todas estas condiciones el invento no se logra.

J. M. Songel: En su experiencia como piloto usted menciona también el diseño de un fuselaje para un avión monoplace como cáscara de celosía.

Frei Otto: Sí, así es como llegué a las cáscaras de celosía, no a través de la construcción de edificios, sino para construir fuselajes de aviones de vuelo sin motor. Entonces empecé a dedicarme a las cáscaras de celosía, y cuando me ocupaba de la inversión de formas todo esto naturalmente me parecía algo completamente automático y lógico. Así fue cómo me involucré en los problemas de las cáscaras de celosía.

J. M. Songel: En el campo de prisioneros de Chartres aparecen también importantes experiencias iniciales, como la construcción de algunas pequeñas bóvedas o el estudio para la optimización de la disposición de los raíles del ferrocarril para construir un puente de celosía.

Frei Otto: Como yo conocía precisamente entonces la posibilidad de la estática gráfica, no me sentía satisfecho proyectando cualquier celosía y después calculándola, y entonces pensé que a partir de la estática también se podría generar una forma, y así desarrollé a partir de la estática gráfica lo que denominé "celosía natural". Fue mucho más tarde cuando supe que el arquitecto e ingeniero alemán Georg Laves había utilizado el mismo método hacia 1820 ó 1830. Y todavía hoy existe un puente suyo en Hannover, casi idéntico al que yo realicé. Por tanto esto no fue nada especial, tan sólo el proceso lógico de llegar a una forma a partir de la estática. Simplemente porque no me cabe en la cabeza que se dibuje cualquier cosa y luego se calcule. Esto siempre funciona, todo se puede calcular. Hoy según la teoría de la elasticidad, entonces con la estática gráfica. En principio ninguna diferencia.

J. M. Songel: Dos métodos distintos, pero el problema es la optimización.

Frei Otto: Sí. La generación de formas a partir de procesos físicos. Eso es realmente. Y hay una serie de procesos físicos, y también procesos de cálculo, a partir de los cuales se generan formas que desde el principio están optimizadas, o que se pueden optimizar en pequeños pasos siguiendo un proceso iterativo. Yo me he ocupado en mayor medida de aquéllos que desde un principio contienen una optimización. Y éstos son principalmente las pompas de jabón, las superficies mínimas y las formas de fluidos, que sólo en muy pocas formas pueden existir porque son muy sensibles. En ninguna otra forma pueden existir, tan sólo en una que podríamos denominar optimizada, en formas mínimas. Y esto ha sido una gran satisfacción ya que ahí se nos ha desvelado un universo de infinitas posibilidades. Hay una infinidad de formas de membranas de pompas de jabón.

J. M. Songel: Pero el ordenador es hoy en día una importante herramienta para la optimización y para la búsqueda de formas. ¿En qué medida son todavía hoy necesarios para esto los ensayos y experimentos físicos con maquetas?

Frei Otto: Con el ordenador sólo se puede calcular lo que en realidad conceptualmente ya está en él. Sólo encuentras lo que buscas, lo no buscado no se puede encontrar con el ordenador. Sin embargo con la experimentación libre sí se puede encontrar lo no buscado. Si realizo experimentos por ejemplo con líquidos restringo entonces de todas las infinitas posibilidades sólo aquellas formas que se pueden construir con estas tensiones superficiales de los líquidos, es decir aquéllas que tienden a formar superficies mínimas. Si empiezo con el ordenador y elimino este criterio entonces obtengo

superficies con tensiones diferentes, superficies con momentos flectores, esfuerzos cortantes y de todo. Puedo hacer infinidad de cosas. Puedo demostrar como arquitecto, o como artista, que puedo construir cualquier escultura, es decir, que la calculo con el ordenador y que adapto entonces las dimensiones, los espesores o las armaduras de acero en el hormigón al resultado del cálculo estático del ordenador. Es decir, que no encuentro formas, sino que en realidad creo las formas. El ordenador sólo hace como si él hubiera encontrado las formas. Teniendo en cuenta pues que así se puede crear una infinidad de formas, en realidad es el hombre que se ha sentado frente al ordenador el que las ha creado y no encontrado.

Este es un gran problema, que la mayoría de los que hoy trabajan sólo con el ordenador no ven, porque pensar en infinitas posibilidades es tremendamente difícil. Yo puedo pensar en todo, hoy puedo calcular todo con el ordenador, puedo decir por todas partes que esta forma la ha creado nuestro ordenador; esto realmente en el fondo es una mentira, la ha creado el artista o el matemático que se sienta detrás del ordenador, que utiliza estos métodos de cálculo tan sólo de modo que obtenga algo que le guste, que se aproxime a su sensibilidad artística. Esto es un problema. Yo me resisto a la mentira que afirma que se ha encontrado todo con el ordenador. De él no pueden salir nuevas invenciones. Es el proceso *put in, put out*. Del ordenador sólo puedes sacar lo que en él has metido.

En realidad todas las cosas son creadas por nuestro cerebro, el ordenador todavía mucho más eficiente, que puede combinar muchísimo mejor,

todo con todo, bien es verdad que de forma imprecisa e inexacta y muy a menudo torpemente, pero puede. Por eso los que sólo se confían al cálculo de los ordenadores son en realidad los verdaderos torpes de nuestra profesión.

Debo decir en primer lugar que desde 1965 todos los edificios que he hecho por supuesto que han sido calculados con el ordenador. Esto es algo muy natural, no hace falta discutir sobre ello, esto se hace hoy en día. Así pues su pregunta era si se encuentra la forma con el ordenador.

J. M. Songel: Sí, la pregunta era acerca de la validez todavía hoy de los ensayos con maquetas para la búsqueda de la forma, y esto también en conexión con objetivos docentes, es decir también como herramienta didáctica.

Frei Otto: Esto es algo muy distinto. Cómo se transmite esto a los estudiantes, esto es algo muy difícil. Pero quiero decirle todavía otra cosa. Aquí nos estamos moviendo incluso en un terreno peligroso. Tengo precisamente ahora un problema en un trabajo justamente en el ámbito de los edificios altos que pueden derrumbarse, en particular las cáscaras y bóvedas que pueden todas ellas hundirse por sí solas. ¿Son nuestros programas de ordenador actuales lo suficientemente buenos como para impedir el hundimiento repentino sin previo aviso? Mi respuesta es que no. Es una cuestión que me inquieta, porque no hace mucho en París, anteriormente en Moscú, e incluso antes tres veces en Alemania, se han desplomado cáscaras repentinamente que realmente habían sido correctamente calculadas con ordenadores y toda la parafernalia, y que también habían sido

comprobadas. Los políticos siempre afirman que piden cuentas a los responsables, pero no podrán pedirles cuentas, porque ellos presentan los programas informáticos que han sido correctamente diseñados según la teoría de la elasticidad.

Aquí nos podemos preguntar por qué nuestros grandes maestros constructores medievales que construyeron las bóvedas románicas y góticas, y por supuesto también Gaudí y otros, que no tenían estos métodos de cálculo, por qué pudieron construir edificios estables, y por qué hoy día ocurren estos fallos a pesar de todo este enorme arsenal de ordenadores. Fallos en el ámbito de todos aquéllos que se dedican a ello, o de sus estudiantes, alumnos o imitadores, que quieren hacer algo sin realmente haberlo comprendido. Parece que los modelos de la estabilidad no hayan sido hasta ahora estudiados con suficiente profundidad.

La cuestión es pues cómo debemos proceder, ya que siempre hemos tenido los dos métodos. Por eso tanto Fritz Leonhardt como Ove Arup crearon un laboratorio. Yo con mi instituto en Stuttgart cooperaba en ese sentido con Leonhardt. Él fundó entonces, en 1964, un segundo instituto de estática de maquetas. Yo creé y dirigí para Ove Arup en Londres un departamento para la construcción de maquetas. Fueron los mismos años en los que empezó el cálculo por ordenador. Concretamente en 1965. Él había reconocido que no es suficiente confiar en el cálculo, ya que podría ser que hubieran fenómenos que éste no alcanzara a explicar.

El fenómeno más interesante es el pandeo de las estructuras superficiales o laminares. ¿Tiene usted una hoja de papel? [Frei Otto pone una hoja de papel

vertical apoyando en un canto sobre la mesa]. Fíjese, esto es un fenómeno. ¿Cuándo pandea una hoja? La hoja está después intacta. Este tipo de pandeo, del que ya se ocupó Euler, se produce en un ámbito en el que no se puede hablar en absoluto de tensiones. No hay ninguna tensión ahí, un poco de peso propio, nada. Sin embargo fíjese en la fórmula de Euler. Euler partió de que la deformación puede comenzar con una figura de forma circular, y ahí entra en este cómputo la famosa letra π (pi). ¿Y cómo se produce el pandeo? En realidad, a partir de ensayos.

Uno de los métodos más importantes fue el procedimiento omega, no sé si lo conoce. El omega es un coeficiente con el que se eleva las tensiones cuando la forma es esbelta. Con él se puede funcionar bien, y de hecho se ha funcionado con él durante varias décadas. Hoy día lo utilizan todos los ingenieros en sus cálculos. Con él se puede calcular ecuaciones llamadas de primer orden. Se crea un multiplicador que se ha generado a partir de ensayos muy sencillos. Mi profesor de estructuras, Bickenbach, y otro, que fue responsable de las instrucciones alemanas de los años treinta, me explicaron esto muy detalladamente, que se habían hallado coeficientes con los que se multiplica las tensiones para poder entrar en este modelo elástico de tensiones.

Pero ¿por qué se nos derrumban las edificaciones? En ninguno de estos casos se trata de edificios que hayan sido cargados más allá de los límites previstos. Se derrumban a pesar de estar intactos. En el ámbito de las tracciones esto naturalmente no juega ningún papel, la edificación se equilibra hasta que vuelve a ser estable. En el lado de las compresiones cuando pandea, bum, se hunde. Muy peligroso, colapso repentino, y los dos

Últimos grandes accidentes – no tengo información detallada, sólo conozco lo que se ha dicho en los periódicos y la televisión – eran con toda claridad bóvedas de celosía acristaladas. Desde luego que con una forma incorrecta, esto lo puedo decir al instante. No eran cáscaras o bóvedas sin flexión. Si éstas sobrepasan una cierta deformación son ya inestables. ¿Y dónde está el cálculo informático que impide esto?

Cuando construimos el pabellón de Mannheim, con Arup y Happold, que trabajaban conjuntamente con sus oficinas, por supuesto hicimos también análisis estáticos con maquetas. Entonces uno se aproxima más a la realidad, aunque estos ensayos sean sencillos, porque estas estructuras sí que se pueden reajustar, y sobre todo se pueden identificar peligros que se pueden presentar. Hoy día esto lo hace mucha gente, después los hacen sometidos a tensiones, tal como Shujov ya remodeló en Moscú. Pero ¡ay!, tienen tensores interiores y hay una pequeña deformación, entonces desaparece el tensor, ya no está. Así que las cáscaras se construyen demasiado delgadas. Y el problema se ve en el lugar incorrecto. Se piensa que en las estructuras laminares o superficiales se consigue la estabilidad, la estabilidad principal se produce, mediante el espesor, no mediante la rigidización en la superficie. Y estas son las discusiones en las que estamos ocupados hoy. Y en mi opinión un análisis informático no es suficiente. Quizás lo sea en un futuro, cuando se encuentren métodos adecuados. Yo hasta hoy todavía no he visto ninguno.

Esto está muy bien, significa que hay campo abierto para nuestros jóvenes. Sólo que son tontos si piensan que podrían ser físicos, teóricos puros. Todo lo que construimos es física aplicada. Y la Estática es

una parte muy conocida de la Física. Y a decir verdad hoy ya no hay más Estática, sino tan sólo Dinámica, y todo el mundo se llama así también, pero se debe tratar con mayor exactitud la dinámica en los edificios: cada construcción se deforma con las cargas. Y esto se hace pocas veces. Qué sucede cuando los edificios se deforman, pueden hacerse inestables con la deformación. Y esto requiere en mi opinión todavía una generación de exactitud en el cálculo, por una parte, y requiere por otro lado la comprobación también en la realidad.

Nuestra construcción adolece de que los edificios, una vez construidos no son comprobados. No se pueden comprobar de ningún modo. No se puede comprobar en ninguna construcción de hormigón cómo se distribuyen las tensiones que se han calculado. En mis edificios de membranas sí que puedo. En una membrana puedo medir la tensión, también puedo medirla en un cable, pero no puedo en edificios de hormigón ni tampoco en edificios de ladrillo. Puedo medir las variaciones de tensión pegando medidores de tensión, pero no la tensión. Puedo saber si aquí ha habido una variación, pero no conozco la tensión. ¿Dónde está el punto cero?

Se trata pues de un tema importante y delicado. A decir verdad todo análisis de tensiones hasta la fecha ha sido impreciso y es poco serio afirmar que se pueden calcular las tensiones en los edificios. Los cálculos son tan sólo métodos de una gran estimación. Calcular la tensión hasta la coma no tiene mucho sentido, porque no se puede obtener con más precisión que un diez por cien arriba o abajo. Tampoco es necesario, porque ni siquiera conocemos las cargas. ¿Quién conoce las cargas del viento o de la nieve? Y

la generación actual de jóvenes ni tan siquiera se preocupa de las cargas, las toma de alguna fórmula que es puramente teórica. Tampoco yo he conseguido estimular a mis colaboradores para reflexionar y preocuparse realmente de la nieve o del viento sobre los edificios, y de lo difíciles que son los ensayos para ello.

Así pues lo que físicamente ocurre en los edificios es un gran desconocido. La cuestión es tan sólo, cómo hacer lo desconocido más conocido. Dos métodos: el cálculo y la comprobación de los edificios o la comprobación experimental en maquetas, porque en la maqueta ya obtengo algunos resultados, no del edificio completo. No puedo construir primero un puente colgante y después medir los cables sin antes haber realizado un cálculo, porque si compruebo que no está bien el refuerzo suplementario posterior es muy caro. En muchas construcciones un refuerzo suplementario posterior no es factible. Especialmente si la construcción se ha desplomado, como ahora en París.

J. M. Songel: Algunos ingenieros cuestionan la transferencia de los resultados de los ensayos con maquetas a la realidad. Lo que es válido a pequeña escala no tiene por qué ser necesariamente válido también en la gran escala.

Frei Otto: Bien, pero para eso hay fórmulas y reglas físicas muy sencillas. Desde luego es necesario conocer las leyes propias de las maquetas, si se construyen maquetas para medir tensiones o esfuerzos. Ese es sólo un ámbito muy concreto. Nosotros construimos maquetas para conocer la forma, y entonces, una vez obtenida la forma, construimos también maquetas para conocer lo que pasa en ellas. Las maquetas

más interesantes son desde luego las que generan formas que están optimizadas por el tipo de construcción de la maqueta. Esto está claro, esto es lo específico de la actividad a la que yo me he dedicado. En primer lugar se trata de producir con las maquetas algo que sea construible, después vendrá el análisis que demuestra, con maquetas, que eso es construible. Esto ya pertenece a otro campo.

J. M. Songel: ¿Podemos ver esto con relación a una obra determinada, como por ejemplo las cubiertas para la olimpiada de Munich? Allí hubo un importante salto de escala con respecto a la experiencia anterior en Montreal. Ahora la escala era mucho mayor.

Frei Otto: No, sólo la edificación fue mayor, pero no las luces. Eran luces libres más o menos parecidas, de modo que las dos edificaciones son físicamente muy similares. Construidas con métodos parecidos, con cables de acero, en gran parte todo superficies mínimas, si por tales se entienden las superficies más pequeñas en el interior de un marco o las tensiones superficiales biaxiales, las dos eran muy similares. Y las dos las calculamos, Montreal de un modo muy sencillo, también ya con ordenador, pero muy sencillamente, Munich en parte más complicada como en el pabellón de deportes, el pabellón de natación se llevó a cabo exactamente igual que en Montreal, y el estadio fue una mezcla de cálculo por ordenador y construcción de maquetas.

Y qué más se puede hacer que apoyarse en estas dos patas para controlar el proyecto, construir las maquetas para la generación de la forma y más tarde comprobar las tensiones en maquetas y en la realidad, porque medimos los esfuerzos en la reali-

dad, una de las pocas edificaciones después de Montreal, medimos cada cable. Fue probablemente la primera edificación en la que realmente supimos lo que había en su interior. También conocíamos los peligros que podrían derivarse de sobrecargas, y lo que ocurría en la estructura cuando la sobrecargamos. En realidad como nunca antes en ninguna edificación. No lo hice ni tan siquiera con mi estudio. No medí las tensiones que hay aquí; demasiada dejadez. En realidad porque no es factible.

J. M. Songel: Quisiera volver a esta cuestión tan importante que plantean los ingenieros con respecto al salto de la pequeña a la gran escala, particularmente en lo que atañe a las maquetas para la generación de la forma.

Frei Otto: Es muy sencillo, si se tiene por ejemplo una maqueta de la misma forma y material y se carga del mismo modo, las deformaciones de la maqueta son lineales con respecto a las de la realidad. Esta es la condición fundamental. Ahora se trata tan sólo de ver si se consigue construir una maqueta que cumpla esta condición. Las maquetas que se tienen que construir para ello son a menudo muy caras. Cuando se trata de hormigón esto es muy difícil. Mi colega Müller ha construido una maqueta especial de hormigón. El hormigón no se puede reducir de tamaño tan fácilmente, hay que reducir de tamaño todos los componentes. Reducir un grano a una escala de uno es a cien es muy difícil, pero es posible. La cuestión es con qué nivel de precisión se puede construir la maqueta. Pero ¿no muestra ya una sencilla maqueta de papel a la manera de Torroja los peligros que amenazan precisamente con la inestabilidad? Naturalmente que sí, entonces, en ese caso, no es necesario construir una maqueta tan cara.

Esta es la cuestión. Es una cuestión a la que sólo se puede responder en cada caso particular. Los principios fundamentales de la experimentación con maquetas son conocidos. Por eso la cuestión de si se puede o no está fuera de duda. Por supuesto que se puede, es más, se debe. ¿Son los cálculos suficientemente seguros como para que podamos tener el valor de limitarnos tan sólo a calcular? Existe por un lado la física experimental, y por otro lado la física teórica. Ningún físico teórico, que puede llegar a nuevos conocimientos mediante la reflexión y las matemáticas, se atreve a publicar o dar a conocer un resultado de sus trabajos si no lo ha comprobado mediante ensayo. Einstein llegó a su famosa fórmula a partir de los resultados de ensayos, luego realizó cálculos, y después se realizaron comprobaciones. Es muy poco serio, sencillamente frívolo, dar a conocer nuevos conocimientos sin comprobación. Y actualmente algunos programas de cálculo informático de estructuras en mi opinión no tienen la comprobación física. Esta es la situación. Por eso hoy pueden hundirse por completo edificaciones, pueden matar personas, de modo que pueden convertir a los ingenieros en homicidas. Naturalmente esto no ocurrirá, porque no se les podrá imputar ninguna intención deliberada, aparte de la torpeza. Yo atribuyo torpeza a muchos ingenieros actuales que utilizan programas informáticos de un modo superficial. No son suficientemente cautos.

J. M. Songel: La cuestión es la comprobación de la teoría que subyace en el programa.

Frei Otto: Naturalmente, esto es lo propio del perito supervisor o inspector del cálculo de estructuras. Él realmente debería utilizar siempre diferentes méto-

dos. Métodos sencillos, pero también otros no tan sencillos, porque en ocasiones con métodos sencillos no basta. En realidad debería realizar al menos un pequeño ensayo con maquetas. A veces con ensayos muy primitivos en maquetas se puede descubrir que algo no es factible. Sólo que no se hacen porque se piensa que con ese estupendo programa informático estamos ya en el lado de la seguridad. No piensan. Pero esto es un problema actual, no tiene nada que ver con el pasado.

J. M. Songel: Es también interesante observar cómo los pioneros de la ingeniería del siglo XX, Maillart, Torroja, Freyssinet ... cada uno según su propio modo, también realizaron estas comprobaciones físicas.

Frei Otto: Y cada uno tuvo sus propios derrumbamientos de obras. A Freyssinet se le hundieron algunas cosas. Laffaille tuvo el famoso desplome. Mi profesor nos mostró en una ocasión el itinerario vital de un buen ingeniero, primero hacia arriba, y luego en algún punto una inflexión, coincidiendo con los derrumbamientos que ha tenido. Sólo que no se habla de ello, porque si se hablara vendría la justicia y los encerraría, y esto no lo quieren ellos. Por otra parte si esto no se lleva a cabo no hay conocimientos. Así que este riesgo hay que correrlo, y ahí está la cuestión, si hay homicidio por imprudencia u homicidio por torpeza. Este es un problema actual y de siempre.

J. M. Songel: Todo esto pertenece a una misma tradición, la de los grandes constructores, ingenieros, arquitectos, maestros pioneros que siempre han tenido bien formado este sentido de lo físico.

Frei Otto: Siempre han sido más los arquitectos. Desde que se produjo la separación entre arquitectos e ingenieros los arquitectos naturalmente se han ocupado más de la visión cualitativa y del estudio minucioso de las construcciones y estructuras, mientras que los ingenieros siempre se han centrado más en el cálculo, siendo así que sencillamente los dos enfoques son necesarios. Yo estoy tanto en el lado de los ingenieros como en el lado de los arquitectos. No hay ninguna separación. Toda posible separación es errónea. La física experimental es exactamente tan necesaria como la teórica. Y no ayuda nada separar, hay que integrar.

En el ámbito de la invención de estructuras la cosa parece muy distinta. La invención de estructuras ha sido hasta hoy todavía trabajo mental. Si usted se sienta frente al ordenador no puede inventar ninguna estructura nueva, el ordenador le muestra tan sólo la infinidad de posibilidades de lo ya inventado hasta hoy, en realidad ya no necesitamos inventar nada nuevo, con el ordenador puede hacerlo todo. Y sin embargo hay una infinidad de invenciones que son posibles y que deberíamos realizar. Pero en realidad no necesitamos inventar nada más, podemos resolver hoy todos los proyectos de construcción del mundo con el repertorio existente. Este es un problema actual que me preocupa. Le he estado hablando más sobre el presente.

J. M. Songel: Hemos hablado ya sobre su metodología experimental, hay diferentes publicaciones del Instituto de Estructuras Ligeras que tratan de ella, como por ejemplo el libro sobre las pompas de jabón.

Frei Otto: Naturalmente todo eso es todavía muy poco, deberían escribirse continuamente nuevos libros, todo eso no basta.

J. M. Songel: Hemos hablado también sobre la validez de las maquetas para la búsqueda de la forma, y ahora me gustaría volver a la sistematización de las formas y de las estructuras. Este problema se ha planteado continuamente en cada generación de arquitectos, parece que es un objetivo que se ha perseguido constantemente, el de conseguir una sistematización globalizadora de la infinita variedad que presenta el mundo de las formas y el de las estructuras, naturalmente también siendo conscientes de la imposibilidad de alcanzar una sistematización definitiva. ¿Por qué se impone ese objetivo de conseguir una clasificación de la infinita variedad de formas?

Frei Otto: Este objetivo realmente no me lo he impuesto en absoluto. Lo que es infinito no se puede ordenar al cien por cien. Pero, como le decía antes, con fines docentes, para orientar a los jóvenes, se puede empezar con cosas sencillas, para introducirlos después en el complejo mundo de lo infinito. Tan sólo por esa razón. No era el objetivo de mi vida ordenar las estructuras.

J. M. Songel: Si consideramos los criterios que usted utiliza para la clasificación de las formas y de las estructuras llama la atención su planteamiento globalizador, su voluntad de incluir no sólo los objetos artificiales sino también los objetos de la naturaleza, su búsqueda de principios comunes. Otras sistematizaciones de las formas, como por ejemplo los intentos de Paul Klee o de Chernijov parecen más abstractos, más geométricos, quizás más influenciados por las vanguardias artísticas del primer tercio del siglo XX, mientras que sus criterios reflejan más la búsqueda de una estrecha relación entre forma y resistencia.

Frei Otto: No he entendido bien su pregunta, pero intuyo que se refiere a la medida en que han podido influir las invenciones formales de la modernidad clásica de la arquitectura o de la pintura. Naturalmente he conocido a Mondrian y a otros. Si han influido en mis trabajos o no, debo responder afirmativa y negativamente. Desde luego afirmativamente si se tenían que inventar estructuras aditivas, pero negativamente si se trataba de experimentos con procesos físicos.

J. M. Songel: Sí, la pregunta iba más dirigida hacia los orígenes de sus criterios para la sistematización. Así por ejemplo si los criterios "forma positiva", "forma negativa", "cavidades", "cuerpos huecos" proceden quizás de los experimentos con estructuras neumáticas. O si los criterios "picos y depresiones", "bordes", "esquinas" tienen su origen quizás en la experiencia con redes o carpas.

Frei Otto: No, fueron consideraciones meramente lógicas que yo planteé, pero no creo que haya podido influir ahí ningún tipo de teoría.

J. M. Songel: Con respecto al pabellón de Mannheim, que en su momento alcanzó la luz más grande de las cáscaras o bóvedas de celosía, ¿cómo valora usted esta obra en su escala, como superación de los límites de luces de las bóvedas de celosía, como prueba de las posibilidades de este tipo de estructuras de cubrir grandes luces? En alguna ocasión ha mencionado usted cómo se transformaba esta estructura de una parrilla muy flexible en una cáscara de celosía muy consistente.

Frei Otto: El producto final fue de tal modo que yo me maravillé de que realmente consiguiéramos poner en

pie esta obra, una construcción que por otra parte soportó bien una prueba de carga que realizamos, y que continúa en pie todavía hoy, aunque el año próximo cumplirá ya treinta años, si no me equivoco. Es la obra por la que he sentido más miedo, la obra más audaz, que realmente sobrepasó mis conocimientos de entonces y quizás también los actuales.

Yo estoy muy agradecido a Ove Arup y a Ted Happold y sus colaboradores por su colaboración. La obra por supuesto fue calculada correctamente, y sin embargo conocemos e intuimos las dificultades que podría tener. Y debo dar gracias por que nunca haya tenido que soportar las cargas que la habrían destruido. En realidad fue pensada tan sólo para la exposición de jardinería. Seguramente algún día será retirada, pero se ha permitido que siga en pie, y cuanto más vieja se hace tanto más me inquieta. No sé qué debería hacer, ¿debería decirle al propietario que convendría que la derribara, para que yo pueda dormir mejor?

J. M. Songel: Con respecto a la transición o la transformación de una cáscara de celosía en un determinado número de soportes puntuales, concretamente en el proyecto para el centro gubernamental (KOCOMMAS) en Riad, propuso usted una bóveda de celosía de malla hexagonal apoyada en soportes arborescentes. ¿Se podría considerar estos soportes como un paso adelante en el desarrollo del tipo de soporte de la bóveda de celosía, más acorde con el principio de la inversión antifunicular? ¿Y por qué una malla hexagonal y no una cuadrilátera, tal como había sido la bóveda de celosía clásica?

Frei Otto: Muy sencillo, porque quería probar este tipo de malla.

J. M. Songel: ¿Por alguna razón física?

Frei Otto: Bueno, porque es razonable aprender lo que ocurre con una malla hexagonal. Las cáscaras de celosía de la naturaleza viviente son en su mayoría hexagonales, aunque en la técnica las cuadriláteras son más fáciles de construir. También aprendí con este proyecto, que no llegó a llevarse a cabo, a evitar las mallas hexagonales; son muy peligrosas y caras, porque hay que dedicar un cuidado extraordinario a los elementos de conexión. No tienen ningún elemento en el que estén seguras, ningún elemento que atraviese de forma continua, tal como en Mannheim. Con las mallas hexagonales las barras se topan unas con otras, no hay nada que atraviese de forma continua. Con mallas triangulares las barras de nuevo pueden atravesar los nudos de forma continua, pero las mallas tienen tamaños distintos. No se puede desarrollar sobre un plano una cáscara de celosía de malla triangular. Las mallas cuadriláteras por tanto tienen la ventaja de que pueden atravesar los nudos de forma continua y tienen una construcción sencilla. Las mallas hexagonales son más difíciles, y actualmente en una obra mía algunos ingenieros quieren utilizar mallas hexagonales o triangulares, que en realidad son mallas hexagonales camufladas, y se sorprenden de que yo no pueda secundarles sin más. Pero esto son de nuevo cuestiones actuales.

En Riad yo quería utilizarlas para conocerlas, y tenía a mi disposición a la mejor oficina de ingeniería del mundo. Cuando se hace experimentación uno debe tener en el lado de lo físico a los mejores colaboradores. Así pues, lo propuse, y si el proyecto se hubiera construido lo habríamos llevado a cabo también, y habríamos conocido todo lo que ya con el

Fig. 234. Aeropuerto de Stuttgart. Fuente: Foto del autor N° P6090109.



234

proyecto habíamos descubierto. Tampoco he llegado a construir nunca mis magníficos soportes arborescentes. Están en el aeropuerto de Stuttgart (fig. 234), pero no son míos. Sin embargo son imitaciones perfectas de nuestro proyecto en Arabia Saudí. Se podría decir que son la prueba de que son factibles, por lo menos en la medida en que todavía permanecen en pie.

J. M. Songel: Ha hecho referencia a algunas cuestiones actuales con respecto a su trabajo con ingenieros. ¿Cómo ve usted ahí el papel del arquitecto y el del ingeniero?

Frei Otto: Lo peculiar de hoy, en la medida que yo puedo decir, es que realmente no siendo físico, no siendo especialista en el campo de las ciencias naturales, en realidad tengo que pedir que se me clarifiquen las cuestiones de las ciencias naturales. Se trata de cuestiones de las ciencias naturales. Estas cuestiones realmente no tienen ya nada que ver con la arquitectura de hoy. Pero sí que han tenido que ver

siempre con la arquitectura de la edad media hasta los tiempos modernos. Sólo en la actualidad el arquitecto se desentiende de buen grado, porque así lo quiere o así lo desea, de las ciencias naturales. Con ello cometen los arquitectos un grave error. La construcción es ciencia de la naturaleza, ciencia de la naturaleza aplicada. El arquitecto no quiere reconocer esto, le endosa esta parte a los ingenieros y entonces tengo yo, como arquitecto, que pedir a los ingenieros de nuevo que sean auténticos especialistas en el campo de las ciencias naturales. Y ellos a menudo le endosan esta parte a algunos programas informáticos. No, las auténticas ciencias naturales requieren desarrollo y comprobación de cada cosa según los criterios de las propias ciencias naturales. Y esto significa por lo menos la doble comprobación, y la comprobación de lo que fue calculado.

Uno puede ver entonces hasta qué punto nuestra ingeniería de la construcción contemporánea ha llegado a ser provinciana, ha llegado a alejarse tanto de la metrópolis del pensamiento, muy por detrás del ámbito científico del pensamiento humano. En otro tiempo estuvo a la cabeza. Los arquitectos eran entonces los físicos de vanguardia. Esto se ha olvidado. Fueron ellos los que realizaron las construcciones más altas, los experimentos más grandes que hubo. Hoy tanto ellos como los ingenieros de la construcción han dejado de ser ya científicos de primer orden. Esta es mi denuncia, pero no soy yo sólo quien habla así; tanto el viejo Ove Arup como Fritz Leonhardt también hablaron así, y hoy también se expresa del mismo modo Stefan Polónyi, que también forma parte del mismo clan: es muy desafortunado que su profesión haya decaído de un modo tan frívolo en la aplicación de unas cuantas fórmulas.

Cuando me siento frente al ordenador todo son aplicaciones de fórmulas. Esto no basta.

J. M. Songel: Quisiera preguntarle también por sus proyectos y obras actuales. He leído algo sobre el proyecto de la Estación Central de Stuttgart 21.

Frei Otto: Ahí tenemos exactamente los mismos problemas que le acabo de referir. Llevamos trabajando en este proyecto más de seis años y todavía no sabemos si la edificación se llevará a cabo. Yo ya cuento con que nunca veré la estación construida. Por razones biológicas, entre otras; yo tengo 79 años, la estación tiene un plazo de construcción de doce años, y yo estimo que no será inferior a veinte años, porque siempre hay retrasos. Aun así no pierdo la esperanza de poderlo ver. Visité hace dos años a Oscar Niemeyer en Brasilia, creo que tiene 96 años o así, conozco también a Philip Johnson, es decir que hay algunos colegas que llegan a ser así de mayores. Pero no cuento con ello, la última guerra me ha hecho mucho daño. Después le enseñaré algo de la Estación Central de Stuttgart.

J. M. Songel: ¿Cómo ve usted el papel desempeñado por el instituto que usted fundó como centro de formación en el campo de la construcción ligera? ¿Se podría afirmar que el instituto ha formado escuela, que ha formado a toda una generación de ingenieros y arquitectos?

Frei Otto: Influido sería una palabra más adecuada, pero también sólo a unos pocos. El instituto ha impulsado conocimientos, que también fueron publicados y que realmente hoy incluso son conocimientos generales, que a menudo no son aplicados. El institu-

to ya no existe en la forma en que yo lo dejé. Tiene, como le dije, otro nombre, y tiene también otras áreas de interés bajo la dirección de mi sucesor, el señor Sobek, que sin duda es un corifeo. Pero él realiza otras cosas. Los trabajos que yo realicé ya no tienen continuación en el instituto. Pero entre tanto hay personas en otros institutos en todo el mundo que siguen impulsando estos trabajos y otras que no. El instituto de estructuras superficiales ligeras que yo fundé, debo decir que lo llevé desafortunadamente también a su fin, porque mi sucesor no ha seguido impulsándolo en la misma dirección, porque mi facultad no quería que se continuara trabajando en ese sentido. Se pensaba que me había alejado a unas alturas demasiado elevadas, y se quería que por fin se volviera a hacer cosas reales pisando el suelo. Así pues la pregunta sobre mi instituto es una pregunta que concierne a la historia, pero no a la actualidad. En las áreas en las que yo trabajé no está sucediendo nada actual, es pues todo historia.

El instituto ya no trabaja en el desarrollo de estructuras superficiales ligeras. Es cierto que en su denominación incluye el término "construcción ligera", pero se ocupa principalmente de rellenos o plementerías de celosías o entramados y problemas de energía, acristalamientos, etc. Esto es también importante, pero ya no tiene nada que ver con las estructuras superficiales ligeras; tiene otros cometidos. No digo que estos nuevos cometidos sean más o menos importantes, tal solo puedo decir que la investigación que yo dirigí allí ya no existe más. Por eso la cosa es quizás historia, pero así es la vida.

J. M. Songel: Usted fue director del instituto oficialmente hasta 1991.

Frei Otto: Exactamente hasta el 31 de marzo de 1991. El 1 de abril me retiré.

J. M. Songel: Pero la publicación de los libros de la serie "*Mitteilungen*" prosigue.

Frei Otto: El instituto los vende todavía y ha habido todavía dos publicaciones que han aparecido posteriormente. La última tan sólo hace algunas semanas, esto es, "Diatomeas 2". Un libro sobre las diatomeas, que también son cáscaras de celosía, muy bonito. Se lo puedo enseñar aquí, quizás no lo tenga usted todavía.

 Mi publicación más importante, la IL 24, dentro de la serie "Forma, fuerza, masa", también apareció posteriormente. Esto ya se desarrolló en gran parte con buen resultado y el instituto lo publicó con los medios obtenidos de la venta de estas publicaciones. Esto está todavía posteriormente bajo mi responsabilidad. Usted ha preguntado naturalmente lo que hace el instituto. Estas son cosas que he estado haciendo como profesor emérito. El instituto en sí mismo, hay que decirlo, tiene mientras tanto otros cometidos, porque la universidad, y también la facultad así lo han querido. ¿Por qué no?

J. M. Songel: El IL 24 es el libro sobre el principio de la construcción ligera, ¿no es así?

Frei Otto: Sí. En realidad es un resumen de mis conocimientos personales en el campo de la construcción ligera. Es muy importante, porque algunas de las cosas que me preguntó, precisamente sobre ecuaciones de maquetas y cosas así, están en el libro. Ahí

está también por ejemplo la deducción de mi fórmula fundamental. He planteado una fórmula sobre el consumo mínimo para construir casas. Es una fórmula muy sencilla.

J. M. Songel: El "Bic".

Frei Otto: Sí, sí, muy bien. La tiene que utilizar usted, naturalmente. Se trata de averiguar y evaluar el consumo de masa de los filamentos, porque son las cosas con mayor capacidad de carga, es decir, cuál podría ser la construcción más ligera de una casa. Una pregunta que ya planteó mi viejo amigo Bucky Fuller. Él dijo que para conocer la efectividad de una casa sólo necesitaba pesarla. Yo le dije que se necesitaba saber por lo menos qué luces o qué volumen tiene la casa. Es decir que la respuesta a la cuestión del volumen y de la masa la encontré con esta fórmula tan sencilla. Lo puede encontrar en el libro. Consúltelo allí.

J. M. Songel: En las distintas publicaciones del instituto hay algunos nombres de sus colaboradores que aparecen constantemente. Hemos mencionado ya antes a Rainer Graefe.

Frei Otto: Lo puede visitar con mucho gusto. Estaría muy bien, él está en Innsbruck.

J. M. Songel: Berthold Burckhardt.

Frei Otto: Es catedrático en Braunschweig. Actualmente es vicepresidente de la universidad, en realidad en el puesto más activo de un profesor de enseñanza superior, prácticamente director general de la universidad.

J. M. Songel: Ewald Bubner.

Frei Otto: Fue profesor en Essen. Está jubilado desde el año pasado, pero vive en Essen. También está accesible en todo momento y también estaría dispuesto a responder gustosamente a sus preguntas.

J. M. Songel: Rob Krier, que posteriormente se hizo tan conocido.

Frei Otto: Sí, Rob Krier. Él es luxemburgués y fue jefe de oficina aquí en mi estudio de Warmbronn. Realizó también todos los dibujos para mi casa vivienda y para este estudio. En realidad era el primer edificio no sólo que dibujaba sino también que tenía la obligación de llevar a término. Él vive hoy en Berlín y fue durante mucho tiempo profesor en Viena. Estoy en contacto con él de vez en cuando.

J. M. Songel: Es también curiosa la transformación del universo formal que él utilizó después.

Frei Otto: Hay muchos que han recibido una formación como arquitectos y que han quedado marcados por su formación. Sus profesores les han dicho: "tú eres arquitecto, siéntate y dibuja algo, y después lo construyes". Yo les he dicho: "nosotros no dibujamos nada, sino que buscamos lo desconocido". Y algunos, entre ellos Rob Krier, querían ver finalmente realizada en algún momento esta visión del arquitecto, dibujar algo. Él es un hombre muy emocional. No sé si usted ha escuchado alguna vez alguna conferencia suya. Es un espectáculo, un estallido de energía. Y cuando yo le decía que una ciudad no se puede proyectar, que una ciudad sólo se puede dejar desarrollar, entonces naturalmente, y esto me parece

bien también, él opinaba de forma completamente diferente. Él decía que una ciudad sí que se debía poder proyectar. Y hace dos o tres años en Berlín le felicité; allí ha construido su ciudad. No sé si la conoce, Kirchsteigfeld , junto a Potsdam Brewitz, en las afueras de Berlín.

Él ha tenido allí todo lo que ha necesitado, arquitectos y demás, y por fin ha visto realizado su gran deseo interior de construir una ciudad. Para él como arquitecto no había nada más grande que construir una ciudad. Esta es una cuestión de anhelos ardientes y por eso naturalmente tuvo que alejarse del camino que yo decía. A mí no me interesa tanto configurar o diseñar casas como un escultor. Lo que me interesa es cómo deben ser y cómo deben generarse las casas en realidad por sí solas o a partir de ellas mismas. Esta es la diferencia. Yo le aprecio mucho, somos muy buenos amigos, y nos entendemos bien.

J. M. Songel: Gernot Minke fue también en los inicios un colaborador muy importante.

Frei Otto: Sin embargo ha mantenido poco contacto con el instituto. Él ha hecho de un campo que atendí también en los inicios del instituto su propio campo, esto es, estructuras de tierra, arena, arcilla, etc. Ha sido profesor en la Escuela Superior Conjunta de Kassel, y he oído que ahora está también jubilado. Seguro que ha debido tener éxito en su docencia.

Le interesará saber que para el próximo año hay prevista una gran exposición de mis trabajos en la Pinacoteca Moderna de Munich. Tres mil metros cuadrados, enorme. Y la Universidad Técnica de

Munich está actualmente elaborando una actualización histórica. En ello están los profesores Nerdinger y Rainer Barthel.

J. M. Songel: ¿Podría hablar un poco de su próximo libro titulado “la red”?

Frei Otto: Este trabajo comprende en realidad dos trabajos, uno se refiere a los sistemas de caminos e infraestructuras, y el otro se refiere a las redes en la naturaleza viviente. Pero no a la clasificación de las redes, sino a qué redes hay en la naturaleza viviente. Esto es naturalmente una unidad, la clasificación más simple que hay. El libro trata de indagar en los orígenes de las formas, y también describe cómo se han generado probablemente las redes en la naturaleza viviente, es decir, los inicios de la vida, etc., y también su evolución hasta hoy, qué aspecto tienen hoy. Es el texto más difícil que he redactado en mi vida. Tiene poco que ver con clasificaciones y sistematizaciones, y trata más de la exposición de la idea fundamental de que todas las formas de la naturaleza viviente existen merced a sistemas de fibras rellenos de agua.

J. M. Songel: El principio de las estructuras neumáticas.

Frei Otto: Sí, el concepto de estructura neumática o *pneu*, que también por deseo de los biólogos hemos utilizado siempre en mi instituto. En realidad lo he sustituido por el concepto de *hydro*, porque la palabra *pneu* y *pneuma*, de origen griego, significa aire, es decir que realmente se trata de los llamados en otro tiempo *pneus*, ahora *hydros*, rellenos de agua, de la naturaleza viviente. ¿Qué aspecto tienen? ¿Qué capacidad resistente tienen? ¿Cómo se originan sus formas? El resultado más interesante es que todas las

formas de la naturaleza, sin excepción, tienen tan sólo un único principio constructivo, y que realmente tienen también la misma resistencia y las mismas condiciones básicas. Desde un microbio hasta una ballena, o un elefante, o una secoya. Un solo principio, nada más. El principio es el mismo, la gama de variación es del orden de cuarenta mil millones. Tantos tipos o clases existen. Y desde luego una nueva interpretación del principio genético, que no sólo indaga en los átomos sino en el concepto subyacente a las retículas de las grandes moléculas. Este es el trabajo.

Sigo manteniendo la opinión de que es un camino equivocado la imitación directa de los objetos de la naturaleza viviente con el propósito de construir casas a partir de ahí. Esto no lo he dicho nunca. Esto lo considero incorrecto. Lo que sí creo es que deberíamos conocer los objetos de la naturaleza viviente. También medir con escalas equivalentes. Porque los principios de la generación de la forma son en algunos ámbitos muy similares. Por ejemplo en el campo de las estructuras neumáticas soportadas por aire, o sea de los auténticos *pneus*, son estos principios similares, no idénticos. Es poco científico tomar la naturaleza como modelo. La naturaleza no es imitable, porque es muy complicada. En principio es muy sencilla, pero en los efectos es muy complicada. Esto no se debe interpretar equivocadamente. Todo el mundo me atribuye que mi ocupación en la biología sólo la utilizo para crear una nueva arquitectura. Esto no es cierto. Simplemente tan sólo quiero saber, con gran curiosidad, lo que es la naturaleza.

J. M. Songel: En mi tesis doctoral he considerado sus sistematizaciones no sólo individualmente sino también en relación con sus experimentos. Por ello dese-

arí saber un poco más acerca de sus ensayos y construcciones con maquetas, acerca de las formas, los materiales.

Frei Otto: Para mí en esto no hay límites. Según el tipo de problema planteado hay que inventar también los métodos del experimento. Con respecto a eso no hay límites, para eso se puede recurrir a lo que se quiera. Es totalmente libre el que se utilice hilos, agua, yemas de huevo o cualquier cosa con la que se pueda experimentar. Lo importante es que de los resultados se puedan extraer conocimientos. Desde luego los ensayos con maquetas más estupendos son los que no cuestan mucho.

J. M. Songel: ¿Me podría decir algo más con respecto a maquetas concretas?

Frei Otto: Sí, por supuesto. Hemos construido ahora en estos últimos años cuatro maquetas que están relacionadas exclusivamente con la maqueta de la estación de Stuttgart. Aquí tenemos tan sólo unas trescientas maquetas realizadas con muy distintos métodos de construcción de maquetas. Para mí los métodos son ilimitados. Para cada problema encontramos nuevos métodos específicos.

Le voy a enseñar pues lo que tenemos ahora. Esto es sólo una pequeña parte de todo lo realizado. Todo no se lo puedo enseñar. Las máquinas o los aparatos con los que hemos realizado los experimentos de los caminos mínimos y todo eso no se los puedo mostrar, esto lo puede buscar en las publicaciones. Esto será siempre interesante si en algún momento son necesarias aplicaciones. Lo más importante es que para una tarea actual hagamos el experimento

adecuado. Yo antes hacía siempre los experimentos muy complicados, porque no me atrevía a hacerlos sencillos. Realmente tampoco tenía los conocimientos que me permitieran extraer resultados a partir de experimentos sencillos. Para poder comprobar la estabilidad de una cáscara a partir de una sencilla maqueta de papel hacen falta muchos conocimientos. ¿Se da cuenta? Cuantos más conocimientos tanto más sencilla podrá ser también la comprobación. Para mí las maquetas han sido siempre un medio tanto para la creación de lo nuevo como también a la vez para la comprobación. Bueno, le enseño un poco de lo que hay por aquí.

Hay varias maquetas que están relacionadas con la estación de Stuttgart. Ahí observé que mis colegas sencillamente no entendían lo que es una curva de curvatura constante. Por eso surgieron algunas maquetas para mostrar esto. Entre ellas alguna compuesta de varias partes. Y yo tenía que hacer comprender cómo la cuestión de introducir una carga puntual en una estructura superficial se puede resolver realmente sin que se originen grandes picos de tensiones extremas, si esta carga se transmite mediante un cable en forma de lazo o bucle. Esta es la forma que encontré, no que inventé, sino que encontré en mi experimento: una curva de curvatura constante. Comienza a partir de una superficie plana con un círculo perfecto. Y esto está emparentado con el círculo, ahí sólo hay un círculo que gira alrededor del eje longitudinal. Una figura con una precisión geométrica total. Una maqueta como ésta no tiene pues nada que ver con la estática de maquetas, es puramente geométrica, es necesaria para la docencia. A este tipo pertenecen varias maquetas. (fig. 235).

Fig. 235. Maquetas geométricas. Fuente: Fotos del autor N° P6070001/ 2.

Fig. 236. Maqueta de malla hexagonal. Fuente: Foto del autor N° P6070003



235

236



Esto (fig. 236) por ejemplo es una malla hexagonal, no para ser construida así, sino para mostrar, cuando las partes se encuentran o concurren en los nudos formando ángulos inferiores a 120° , que esta superficie tiene tensiones uniformes, porque sólo entonces se puede formar un nudo, cuando los ángulos son iguales. Naturalmente mediante la influencia de este punto puedo construir esta forma con total exactitud con una película de jabón. Aquí en esta maqueta no con tanta exactitud, para que la forma se pueda mantener. Con una película de jabón la forma se mantiene tan sólo durante algunos segundos, después desaparece, de modo que no puedo mostrar la forma a nadie. Si la hago rígida o duradera entonces deja de ser exacta.

Hay muchos otros tipos de maquetas, como por ejemplo maquetas para comprobar la estabilidad. Estas son las más difíciles que se pueden construir. Esta maqueta está construida de forma que se puedan retirar los soportes, entonces queda libre. La cuestión entonces es si se hunde o no. Está toda despiezada. Y si es una auténtica bóveda entonces se mantiene en pie, como si estuviera construida con piedras.

Newton y Hooke ya plantearon esta teoría de que las fuerzas de una forma colgada son las mismas que las de una forma erguida. Yo también he corroborado esta teoría mediante ensayos con maquetas. Siendo todavía estudiante construí esta maqueta, la cadena erguida (fig. 237). Aquí también puedo variar completamente la línea del arco, pero sólo hasta un cierto límite. Si sobrepaso ese límite, es decir, cuando la línea de presiones llega a ese límite, entonces el arco se hunde inmediatamente. Esto significa pues que necesito un cierto espesor en el arco.

Fig. 237. Maqueta de cadena erguida. Fuente: Foto del autor N° P6070006.

Fig. 238. Maqueta inicial de la estación de Stuttgart. Fuente: Foto del autor N° P6070008(r).



237

238



Así pues hay muchos tipos de maquetas que se pueden construir. También por ejemplo para ver cómo se deforma elásticamente un cuerpo.

El proyecto Stuttgart lo iniciamos con esta idea (fig. 238), prácticamente como una cubierta colgada que se extendería por encima del hoyo excavado en el suelo. Aquí naturalmente aparece de nuevo el soporte apuntado con el ojo o lazo, y después de muchos pasos intermedios construí esta maqueta (fig. 239). Ahora está de pie, es decir fue rigidizada mientras colgaba, y después se le dio la



239

Fig. 239. Maqueta colgada, rigidizada e invertida de la estación de Stuttgart. Fuente: Foto del autor N° P6070009(r).

Fig. 240. Maqueta del concurso de la estación de Stuttgart. Fuente: Foto del autor N° P6070007.

240



vuelta. Hubo que dar un paso muy importante para conseguir esto. Todas las otras maquetas que están por allí se realizaron para desempeñar funciones determinadas. Esta maqueta (fig. 240) se construyó para que el arquitecto y el promotor ganaran el concurso. Con ella ganamos el concurso. Y también para ver el aspecto que podría tener el espacio interior.

La maqueta más grande y extensa es ésta (fig. 241 y 242). Muestra toda la estación vista desde abajo. Las plantas están aquí. Esta es la vieja estación

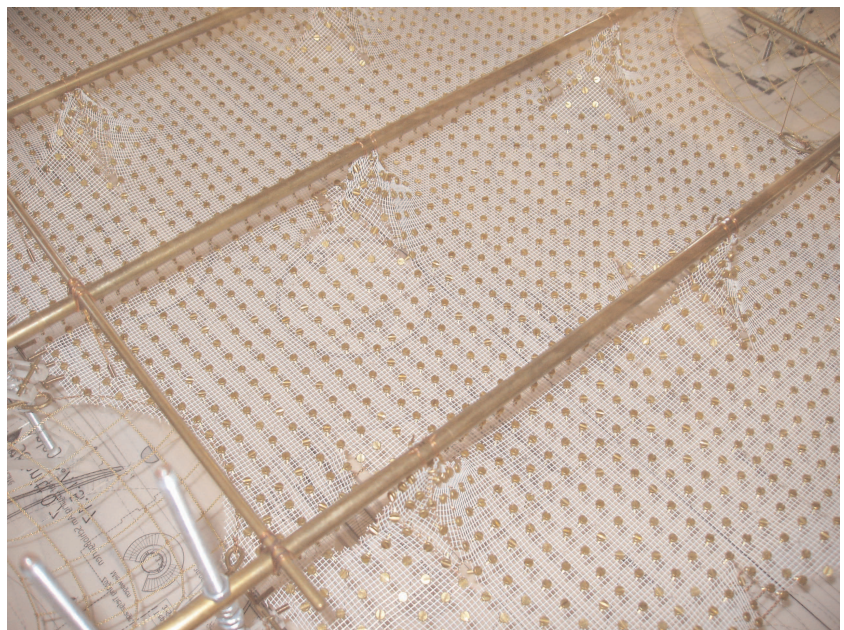
Fig. 241. Maqueta de la estación de Stuttgart vista desde abajo. Fuente: Foto del autor N° P6070010.

Fig. 242. Detalle de la maqueta de la estación de Stuttgart vista desde abajo. Fuente: Foto del autor N° P6070011.



241

242



en su ubicación exacta. Hay una regla que rige. Si se puede construir en la maqueta algo flexible, entonces eso se puede fotografiar o medir directamente. Aquí hicimos las dos cosas. Se puede utilizar para ello la fotogrametría o también aparatos de medición directa, y después se puede calcular siguiendo un proceso iterativo. No es necesario generar la forma

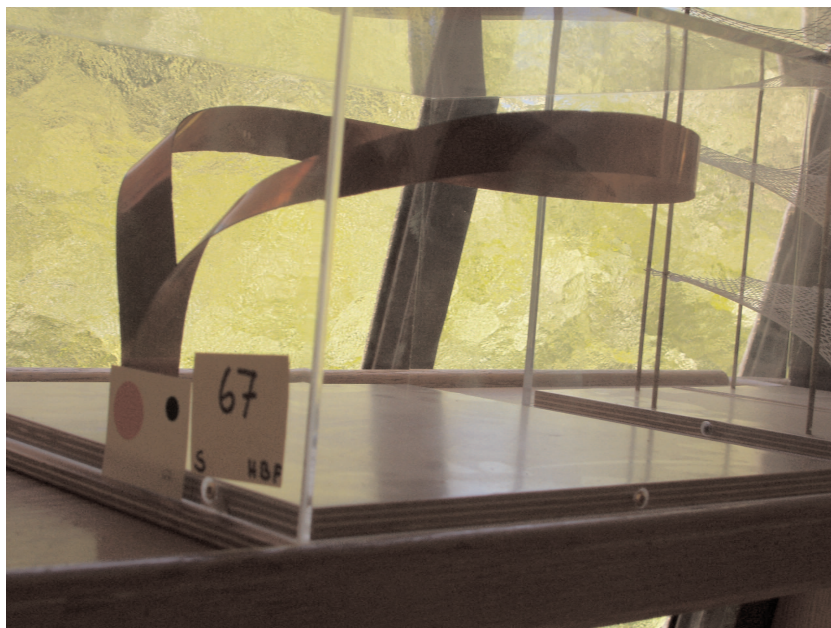


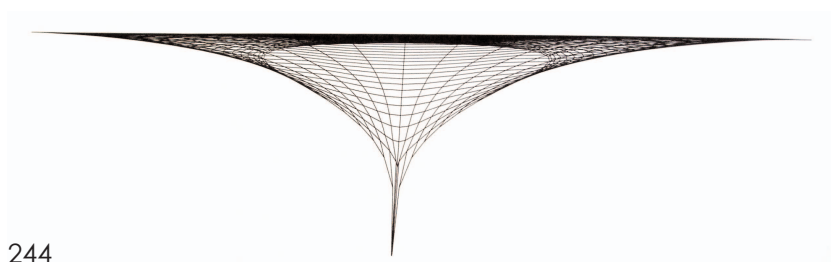
Fig. 243. Maqueta geométrica de una curva de curvatura constante. Fuente: Foto del autor N° P6070012.

243

en el ordenador. Se puede hacer prácticamente a mano. El despiece de los patrones de la cubierta de Montreal lo hicimos a mano. Posteriormente, como los métodos de cálculo por ordenador comenzaban entonces, lo calculamos. Y también en la olimpiada de Munich el pabellón de natación y el estadio los hicimos a mano. No es necesario para ello ningún programa informático. También se puede navegar a vela a mano, sin ordenador. Hoy se puede pilotar un barco de vela también con un ordenador. Esta es sólo una cuestión de economía.

Volvamos ahora de nuevo a la explicación de las curvas de curvatura constante (fig. 243), que le mostré antes abajo. Ahí ya desconecta la mayor parte de la gente. La gente conoce el círculo, pero además del círculo está también la línea espiral, la línea helicoidal; son también curvas de curvatura constante. También hay muchas otras. Y nosotros hemos intentado conocer a fondo estas curvas de curvatura constante.

Fig. 244. Representación gráfica de superficie mínima obtenida mediante cálculo informático. Fuente: Foto del autor N° P6070013(r).



244

J. M. Songel: ¿Esta maqueta está hecha tan sólo con una pletina metálica con los extremos unidos?

Frei Otto: Sí, así de sencilla se puede hacer. Por supuesto hay que controlarla y revisarla. También se puede hacer la curvatura desigual, pero ya sólo la curva exacta de curvatura constante le permite a uno infinitas posibilidades. Del mismo modo que se puede hacer un círculo más grande o más pequeño variando el radio, podemos hacerlas más grandes y más pequeñas. Y si modificamos la unión o la conexión, entonces surgen realmente infinitas posibilidades. La discusión sobre la idea o el concepto de lo infinito es muy, muy importante. Esto es algo que la mayoría de los arquitectos no entienden, el que haya infinitas posibilidades para la arquitectura del futuro. No hay ningún punto final, nadie lo quiere entender, uno siempre quiere tan sólo hacer su propia casa.

Una de las hojas más fascinantes la tengo aquí (fig. 244 y 245), es un cálculo informático de la fórmula de la superficie mínima, realizado por mis colaboradores Bodo Rasch y Jürgen Bradatsch, y un colaborador de ellos que se llama Gavenat. Los cálculos han sido realizados también con las fórmulas de un antiguo colaborador mío, Eberhard Haug, que fue mi primer ayudante aquí. Él está ahora en Francia y hace carrocerías estables para las fábricas francesas de automóviles. Y con el programa informático se ha representado aquí, en estos planos, con diferentes variantes y variaciones la superfi-

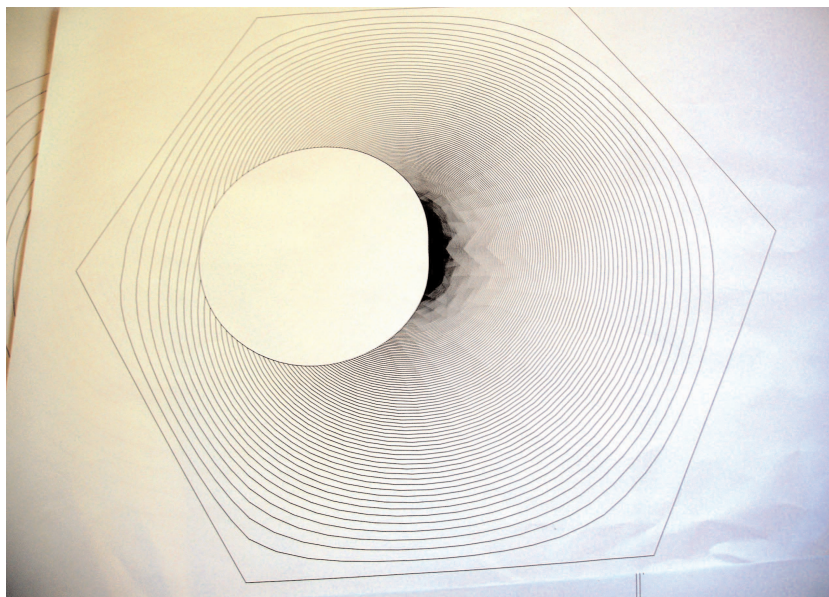
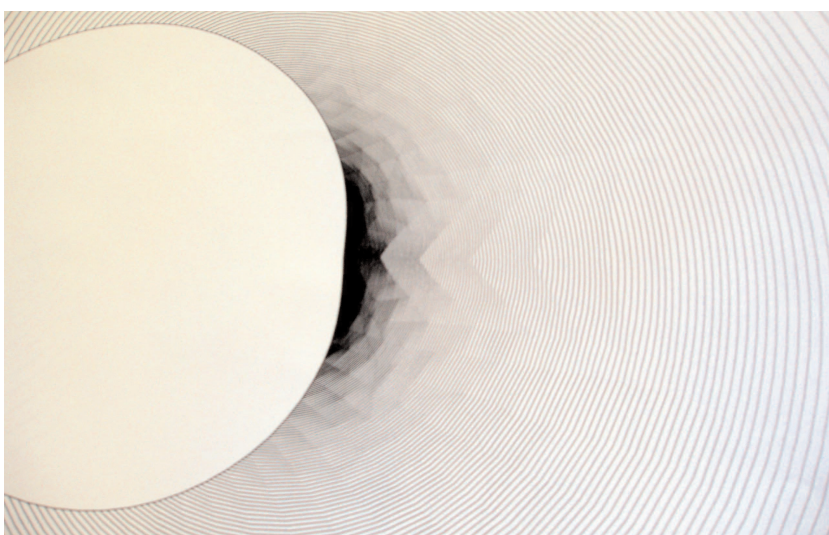


Fig. 245. Representación gráfica de superficie mínima obtenida mediante cálculo informático. Fuente: Fotos del autor N° P6070014/5(r).



245

cie mínima, es decir la misma superficie que podemos producir con una película de jabón.

J. M. Songel: ¿Cómo llegó a estas fórmulas? ¿Mediante los experimentos con películas de jabón?

Frei Otto: Sí, con películas de jabón. Fue en 1961. Muy sencillo. Colgamos una película de jabón, cogimos un hilo – por supuesto hay que estudiar a fondo el experimento – rompimos la película de jabón que quedaba en el interior del hilo, y enton-

ces se genera el círculo, tal como le mostraba antes, un círculo perfecto. Cogimos el hilo, intentamos tirar hacia fuera, y entonces se genera esta superficie. Sólo ahora se puede calcular. Es decir, que ha permanecido más de cuarenta años sin poderse calcular, pero realmente esto no ha tenido una gran trascendencia. Le dije a mi colega Linkwitz que había que poder calcularla, pero si él no podía calcularla, yo la construía a pesar de todo, no era necesario que yo conociera la fórmula. La fórmula es muy complicada. Realmente hasta hoy todavía no la tenemos, porque este programa desarrolla esta fórmula siguiendo un proceso iterativo. Pero esta es la planta de esta superficie (fig. 245). Es realmente fantástico ver con qué precisión se ha podido llegar a esto.

J. M. Songel: Es una cuestión importante, si se conoce la fórmula, o si se construye sólo lo que es calculable. Así por ejemplo Maillart con las láminas delgadas de hormigón que utilizó en sus puentes, eran formas que no se podían calcular con exactitud en su época.

Frei Otto: Sí, está claro. Esto tiene su ventaja y su desventaja. Gracias a Dios ha habido ingenieros que han participado de ese modo de pensar, como Fritz Leonhardt. Realmente hemos construido cosas que no eran calculables.

J. M. Songel: Torroja también.

Frei Otto: Torroja también. Y está muy bien. Yo les he dicho a algunos ingenieros: si vosotros no podéis calcular, yo construyo a pesar de todo, porque si se realizan experimentos muy precisos con maquetas y se conocen las fórmulas de las leyes propias de las maquetas, entonces puedo y tengo derecho a

comprobar enteramente puentes, cáscaras y también celosías con maquetas cuidadosamente construidas. Fritz Leonhardt construyó puentes muy complicados para carreteras, con plantas que no se habían construido nunca. La única posibilidad en los años cincuenta era con maquetas, tomando una lámina de aluminio o de vidrio, y midiendo las deformaciones bajo cargas. Luego se puede contar de nuevo con las tensiones críticas en el hormigón, se puede hacer después una prueba y se puede construir el puente. Si además se comprueba todavía la deformación bajo el peso propio, y a ser posible se realizan todavía comprobaciones de fisuraciones, entonces podemos tener una cierta seguridad. Se podía construir. Hoy día los jóvenes estudiantes piensan que si no tienen ningún programa informático no pueden construir. Con frecuencia se construye de forma más segura con estos viejos métodos, si es que los programas todavía no lo contienen todo. Este es el problema de hoy, o digamos el problema de los últimos treinta años. Yo soy aun un arquitecto de la vieja escuela.

Se trata tan sólo de la cuestión de si se olvidan las experiencias y las condiciones. Y esto puede ser en mi opinión muy peligroso. Y tampoco se piensa por qué algunas construcciones se han mantenido en pie a lo largo de siglos, décadas o milenios y son todavía estables, y hoy día se hunde al instante una construcción que está bien calculada. Todas han sido correctamente calculadas, las que se han derrumbado últimamente. En la mayor parte de los hundimientos actuales se trata de cáscaras o bóvedas de celosía, en cuyo desarrollo he contribuido yo. Porque la gente que se dedica a ellas no procede con suficiente cuidado.

Fig. 246. Maqueta colgada e invertida de malla hexagonal para la estación de Stuttgart. Fuente: Foto del autor N° P6070016.



246

Esta maqueta que hay aquí (fig. 246), también ha sido construida colgada.

J. M. Songel: Pero estaba prevista para ser construida en piedra.

Frei Otto: No, se trata tan sólo de la forma. En realidad es igual. Lo podría construir con piedra natural. Todos los elementos de la estación de Stuttgart los podríamos construir también como una bóveda de piedra natural. La maqueta fue construida colgada, es decir invertida. Son pequeños bloques de madera que fueron colgados juntos con hilos. Y luego aparece esta forma. Y si conozco la forma es muy fácil de calcular, esto no es ningún problema.

J. M. Songel: De nuevo la cuestión de la malla hexagonal.

Frei Otto: Bueno, es una malla hexagonal porque se ha pensado construirla de nuevo como cáscara cerrada. En el campo de las compresiones simples, si no tengo

nunca flexión, puedo utilizar también el hexágono. En el hormigón puedo recoger limpiamente todos los esfuerzos en una malla hexagonal. En el acero y la madera no tanto, porque los perfiles de acero son delgados y largos, y la madera es siempre fibrosa, la madera es un material que funciona mejor que el acero. Pero el hormigón es una estructura superficial. Y realmente para desarrollar una estructura superficial puedo utilizar fácilmente a partir de aquí una cáscara nervada o una cáscara continua, yo sólo quería conseguir la forma. Una forma que tuviera tensiones lo más uniformes posibles. Esto lo puedo comprobar más fácilmente con un material hexagonal. Esto se lo he mostrado antes abajo. Con un material hexagonal puedo comprobar la uniformidad de tensiones y transformar fácilmente una red de cadenas en una cáscara de hormigón. En la construcción de maquetas este es un método para encontrar la forma de una cáscara de hormigón.

Podría construir esto tanto como una cáscara de hormigón como también como una cáscara nervada de piedra natural. En el gótico se construyeron este tipo de bóvedas, sin el agujero, que no se conocía entonces. A excepción de los derrumbamientos; ahí se generaba el agujero y la cáscara permanecía. Yo estudié esto después de la guerra, el hecho de que en algunas bóvedas hubieran agujeros y las cáscaras no se hubieran hundido.

J. M. Songel: Estas (fig. 247) son maquetas realizadas con materiales tradicionales.

Frei Otto: Sí. Todo esto pertenece al campo de la estabilidad. Lo que le he mostrado se puede hacer con el juego de pequeños bloques. Mi padre era, como usted sabe, escultor y cantero, mi abuelo tam-

Fig. 247. Maquetas construidas con materiales tradicionales. Fuente: Fotos del autor N° P6070019/20.



247

bién. Y mi padre se ocupó mucho de los métodos del arte de la cantería medieval. Cómo construyeron entonces sus bóvedas y cómo sabían que no se derrumbaban, porque no existía entonces ningún señor Hooke o Newton. Tampoco existía toda la matemática que hemos tenido, y programas informáticos menos todavía. Y sin embargo sabían cómo

debían ser los edificios. Hoy día en mi opinión tenemos de nuevo estos conocimientos, pero no los aprovechamos y yo intento transmitirlos. Con todo esto tienen relación naturalmente también ensayos con maquetas de este tipo tan sencillo.

Hemos analizado el Panteón porque me interesaba saber a partir de qué acción horizontal llamada seísmo se hunde el Panteón, y con estas maquetas tan sencillas hemos obtenido como resultado aproximadamente un tercio de la fuerza de la gravedad. Por tanto podemos deducir a partir de ahí que Roma no ha tenido nunca en los últimos mil ochocientos años ningún seísmo de mayor acción que 0'3 g. Este es un seísmo de considerable importancia, naturalmente, pero los hay más graves. En el ensayo con maqueta podemos destruir el objeto. También lo hicimos. Hemos puesto a prueba también la estación de Stuttgart frente al seísmo y sabemos exactamente a partir de qué acción es ya inestable. Toda construcción se hace inestable con el seísmo, la cuestión es sólo qué dimensión debe alcanzar éste.

Y la construcción más segura es la estructura neumática. Con el seísmo no se destruye. La forma constructiva considerada por todos como la más inestable, es en realidad la más estable. Y cuanto menos masa propia tiene tanto más estable es. La construcción más estable es la que no está o la que se ha derrumbado. Siempre he dicho a los estudiantes que la construcción hundida es la más estable. Y la construcción que está en pie, la torre, tiene un grado de inestabilidad. La cuestión es tan sólo qué magnitud pueden tener las acciones exteriores para conseguir que se derrumbe. Toda torre, toda casa es en principio inestable. Toda la arquitectura es sólo un hacer

Fig. 248. Frei Otto en su taller-estudio de Wambronn. Fuente: Foto del autor N° P6070017.



248

temporalmente estable lo que en principio es inestable. Pero esto hay que comprenderlo previamente.

J. M. Songel: Temporalmente estable, durante la vida del edificio.

Frei Otto: Correcto. Mientras viva un edificio debe ser estable, debe ser temporalmente estable. Y si se ha venido abajo ya es definitivamente estable. Cuando yace en el suelo ya no puede ocurrir nada más. Pero de estos pensamientos hay que ocuparse, naturalmente, desde la filosofía.

X.2. Conversación telefónica mantenida con Jürgen Hennieke el 15 de Octubre de 2004.

Jürgen Hennieke es el único colaborador de Frei Otto que sigue en 2004 todavía en activo en el instituto de la Universidad de Stuttgart que ha sucedido al que fundara Frei Otto, actualmente denominado "*Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren*", fruto de la fusión en el año 2001 del *Institut für leichte Flächentragwerke*, dirigido hasta 1991 por Frei Otto y el *Institut für Konstruktion und Entwurf II*, que había dirigido Jörg Schlaich. Jürgen Hennieke ha sido un importante colaborador del instituto de forma ininterrumpida desde 1968, año en que obtuvo el título de ingeniero de estructuras, hasta la actualidad. De su dilatada trayectoria cabe destacar su trabajo como director del equipo responsable de las técnicas de desarrollo y medición de las maquetas que se realizaron en el instituto para la olimpiada de Munich, como director del área de ingeniería del instituto, y también como director de equipos de investigación como el de las cáscaras o bóvedas de celosía.

1. La metodología experimental de Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart.

1.1. ¿Cómo ve usted el papel y la importancia del método del "camino inverso" en la búsqueda de la forma resistente, en la reflexión sobre la relación entre forma y resistencia ?

Creo que es más bien una cuestión filosófica porque, siguiendo los principios de Frei Otto, él nunca quería limitarse a imitar cosas, y así pensó en la posi-

bilidad de jugar con métodos experimentales, y sólo entonces intentar transformar los resultados en todo tipo de estructuras naturales. Mucha gente al observar la naturaleza piensa en los atractivos y en las ventajas de determinadas estructuras de la naturaleza, con el objetivo de transformarlas en estructuras técnicas, pero el objetivo fundamental de Frei Otto era explicar los fenómenos de la naturaleza mediante métodos propios de ella, y estimular a la gente a pensar del mismo modo, no tanto con la finalidad de construir o diseñar edificios o estructuras.

El resultado en muchos casos es el mismo. Si tomamos el ejemplo del casco de los submarinos, después de haber investigado en qué medida la textura de la piel de los tiburones reduce el rozamiento con el agua permitiéndoles alcanzar grandes velocidades, vemos cómo se ha intentado aplicar los resultados de estas investigaciones para el diseño de submarinos o embarcaciones. Ese no era el planteamiento o el enfoque de Frei Otto. Él tenía una forma muy personal de ver estas cosas. Recuerdo muchas discusiones en el instituto con personas de fuera acerca de esta cuestión, acerca de cómo se podría mejorar la metodología de diseño mediante esta u otra forma o procedimiento.

La gente que trabaja en el campo de la biónica actúa del mismo modo. Utilizan otro nombre pero su modo de trabajar es el mismo. Es una determinada manera de denominar una actividad investigadora en el campo de las estructuras naturales, así que yo no veo una diferencia sustancial. En el ámbito de la arquitectura, muy particularmente, hay una cierta filosofía que propicia la imitación de las formas orgánicas aduciendo una mayor conveniencia de este

tipo de formas orgánicas o naturales con respecto a las formas rectangulares, verticales u horizontales, pero creo que este planteamiento no es totalmente cierto. Tanto un tipo como otro puede ser útil o necesario.

- 1.2. ¿ Qué necesidad y validez tienen hoy en día todavía los ensayos y experimentos con maquetas para la búsqueda y optimización de la forma resistente teniendo en cuenta las posibilidades que ofrecen los ordenadores ?

Hubo un tiempo en el que la gente que trabajaba en el campo de las estructuras ligeras pensaba que los ensayos y experimentos con maquetas ya no eran necesarios, pero ese tiempo ha pasado ya. Casi todos los que trabajan en este campo, tanto arquitectos como ingenieros, todavía utilizan maquetas. Las maquetas son rápidas, son tridimensionales, cosa que un ordenador no puede llegar a ser, incluso si puedes girar la forma para verla desde distintos puntos de vista en la pantalla del ordenador, al final sólo tienes una forma bidimensional. La maqueta te ofrece una percepción del espacio, es mucho más rápida que la operación de programar, aunque seas un experto en este campo. Construir una simple maqueta de una tienda, por ejemplo, es mucho más rápido que utilizar el ordenador. De modo que la mayor parte de los que trabajan con estructuras ligeras, yo diría que todos, han vuelto a utilizar los ensayos y experimentos con maquetas, al menos como una aproximación en las primeras fases o etapas del diseño, no necesariamente hasta las etapas finales. El ordenador es un instrumento para optimizar, es cierto, pero en las etapas preliminares las maquetas deben

mostrar la realidad, deben llevar a la realidad las ideas que están en la mente.

Cuando hablo de jugar con las formas me refiero a hacer o construir algo y ver lo que sale, ver cuál es el resultado sin sospecharlo o vislumbrarlo de antemano. Esto no es posible con una máquina.

- 1.3. Algunos ingenieros se cuestionan o ponen en entredicho la transferencia de los resultados obtenidos en los ensayos con maquetas a la realidad. Lo que es válido a pequeña escala puede no serlo en la gran escala. ¿Qué le parece este modo de ver, en especial con respecto a los ensayos con maquetas para la generación de la forma ?

Es cierto que no se puede pasar sin más de la pequeña a la gran escala. Hay unos límites muy estrictos. Pero el paso de la pequeña a la gran escala no se apoya directamente en los ensayos con maquetas. No es posible calcular a pequeña escala y transferir los cálculos realizados a la gran escala, aunque nos atengamos a las leyes propias de la estática de maquetas. Se pueden construir maquetas que sean geoméricamente y estáticamente semejantes a la realidad, esto es lo que hicimos para Munich, por ejemplo, pero entonces se deben seguir las ecuaciones que corresponden a las leyes propias de las maquetas, su comportamiento bajo carga, sus deformaciones, etc. Y esto es una forma de calcular, pero no se puede sencillamente ampliar o trasladar a un tamaño mayor, porque ello no significa exactamente que toque la realidad del estado de cargas de la gran escala o de la estructura real, por ejemplo.

Los experimentos son sólo para obtener las primeras ideas prácticas y palpables de la forma. También pueden servir de base para el análisis estructural, incluso para la gran escala, pero esto no excluye todo el proceso propio que se requiere para ello. La finalidad principal de las maquetas es la búsqueda de la forma.

1.4. Con respecto a los ensayos y experimentos con maquetas llevados a cabo en el instituto para la olimpiada de Munich, ¿ qué le parece el papel que desempeñó el instituto y la consideración que finalmente tuvieron estos trabajos en la ejecución de la obra?

Es necesario aquí establecer una distinción. Las dos partes más importantes del conjunto se elaboraron y desarrollaron siguiendo métodos diferentes. El pabellón de natación se basó fundamentalmente en maquetas. Con los resultados obtenidos con ellas se llevó a cabo el cálculo. El pabellón de deportes se calculó principalmente con ordenador. Construimos también la maqueta de este pabellón y los resultados del cálculo se compararon con la maqueta, pero la base fueron los cálculos con ordenador. El estadio se basó en ambos métodos. El noventa y nueve por ciento del pabellón de natación se basó en maquetas, el noventa y nueve por ciento del pabellón de deportes se basó en el ordenador, y con respecto al estadio un cincuenta por cien se basó en maquetas y un cincuenta por cien en el ordenador.

Esto tiene relación con las diferencias en el modo de pensar entre los ingenieros y el equipo de Frei Otto en el instituto. Nosotros construimos maque-

tas de todas las estructuras, pero no todas sirvieron como base para las fases últimas del proceso de ejecución. En todo el proceso de ejecución la programación que se utilizó para Munich se tomó de la NASA. Era básicamente un método de elementos finitos que había que modificar para poderlo aplicar en una estructura de cables pretensados. Las posibilidades de obtener resultados con esta programación iban cambiando y mejorando durante todo el proceso. Esta fue la principal razón de las diferencias entre las tres estructuras. La gente no acababa de confiar en los métodos de cálculo, por un lado, pero tampoco en la construcción de maquetas, por otro. Esto tiene relación con las diferencias en el modo de pensar entre ingenieros y arquitectos.

Había un vacío de conocimiento y de experiencia con relación a este tipo de estructuras. La primera red de cables pretensados, el pabellón de Montreal, se basó solamente en maquetas. Sus luces y sus vanos eran unas seis o siete veces más pequeños que los de Munich. Los ingenieros que participaron en Munich eran distintos de los que habían participado en Montreal, eran otras personas, con otra manera de pensar, y la cuestión primordial era siempre la determinación de las flechas y las cargas, y también otra cuestión relacionada con el problema de la escala: ¿ es posible medir las deformaciones en una maqueta y trasladarlas a una estructura de tamaño real ? Esta pregunta se respondió de distintos modos. Los ingenieros tenían otra opinión sobre esto. Era tan solo algo así como una sensación o una apreciación.

- 1.5. Con respecto al proyecto de investigación sobre las cáscaras o bóvedas de celosía ¿ cómo surgieron o se fueron decidiendo los criterios que regían los diferentes tipos de ensayos o experimentos con formas colgadas de redes catenarias y los criterios para la posterior sistematización de las cáscaras o bóvedas de celosía ?

El modo como surgió la sistematización de las cáscaras o bóvedas de celosía fue fortuito e imprevisto. Realmente surgió tan sólo jugando con redes suspendidas. Viendo qué pasaba o qué cambiaba por ejemplo si colgábamos las redes suspendidas de cuatro puntos, viendo cuáles eran las posibilidades de cambiar la forma. Era como un juego de niños. No seguimos ningún camino prefijado. Realizamos cientos de ensayos con maquetas, siempre con la misma red o con diferentes redes o partes de redes, fotografiamos o hicimos croquis de cada uno de ellos, y por último intentamos ubicarlos en un esquema de sistematización, utilizando tan sólo términos que no habíamos utilizado con edificios convencionales. No había ninguna sistematización dada antes de que empezáramos a construir las maquetas. Seguimos exactamente el proceso inverso. Los criterios utilizados para la sistematización partieron de la propia lógica que los resultados de los experimentos iban generando y no de la pretensión de aplicar las formas en ellos obtenidas para la construcción de edificios.

2. Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart en el contexto de la tradición de los ingenieros pioneros en la búsqueda de la forma resistente con nuevos materiales.

2.1. La fundación del instituto fue propiciada por uno de estos ingenieros pioneros, Fritz Leonhardt. Ted Happold, Ove Arup, Félix Candela y Buckminster Fuller fueron otros grandes constructores o ingenieros precursores que tuvieron una estrecha relación con Frei Otto y su instituto. ¿ Qué otros ingenieros tuvieron vinculación con el instituto, y cuál fue su influencia ?

Hay también otros nombres. Konrad Wachsmann visitó con frecuencia el instituto, y con él hablábamos del modo en que utilizaba elementos prefabricados para crear estructuras. También hay que nombrar a Le Ricolais. Aunque él nunca estuvo en el instituto ni tuvimos contacto personal con él conocíamos sus trabajos y él conocía los nuestros. También habría que mencionar a Stéphane Du Chateau, otro francés que trabajó con estructuras espaciales, y a Makowski, profesor de la Universidad de Surrey. Aunque el contacto con este último no fue muy estrecho porque su campo de actividad, las estructuras espaciales, no era el nuestro, sí que hubieron algunos contactos personales.

2.2. Las estructuras "*tensegrity*", a diferencia de las estructuras de membranas o redes pretensadas de cables, no necesitan grandes y pesados macizos de anclaje. Parecen pues un avance o mejora con respecto a éstas en el camino hacia la ligereza. Fueron en alguna

ocasión objeto de las investigaciones del Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart ?

No, nunca hemos trabajado con este tipo de estructuras. Las conocíamos, pero nunca fueron objeto de nuestras investigaciones. Du Chateau y Bucky Fuller, que tuvieron contacto con el instituto, trabajaron con ellas. Nosotros conocíamos su trabajo y hablábamos con ellos sobre ellas pero nunca formaron parte de nuestra tarea. Frei Otto sencillamente no quería. Sus áreas de interés se concentraban en las membranas, en las redes de cables, en las cáscaras de celosía y todos los otros tipos de estructuras ligeras que investigó, pero no en las estructuras "tensegrity".

2.3. ¿ Cómo consideraban los ingenieros que dirigían la Universidad de Stuttgart a los trabajos y las investigaciones de Frei Otto y su instituto ?
¿ Por qué no se favoreció su continuidad ?

Frei Otto siempre buscó medios de financiación fuera de la universidad. El apoyo económico que ofrecía la universidad era muy limitado. La mayor parte del trabajo que hicimos en el instituto fue financiado por la "Deutsche Forschungsgemeinschaft", el organismo alemán encargado de la investigación, a través de los programas de investigación "Sonderforschungsbereiche" (SFB) que el propio Frei Otto promovió. La mayor parte de los colaboradores del instituto, yo diría que el 95 %, recibían su paga gracias a esta financiación exterior.

El programa SFB 64 surgió a partir de la obra construida para la olimpiada de Munich, con el objetivo de evaluar y desarrollar lo que allí se hizo. El programa SFB 230 surgió a partir de los trabajos del grupo

“*Biologie und Bauen*”, y estuvo más centrado en el instituto y sus colaboradores. No hay que olvidar que muchos de los ingenieros y arquitectos de la universidad, principalmente ingenieros, sentían envidia de los éxitos de Frei Otto y su instituto. Ellos querían tomar parte en estos programas y querían colaborar con nosotros porque nosotros habíamos conseguido financiación, pero realmente no entendían nuestra forma de trabajar. Es cierto que había un cierto reconocimiento hacia nuestra forma de trabajar, de jugar con las formas, etc., pero también había un cierto recelo hacia ella. Frei Otto era el alma rectora de estos programas, ellos le seguían pero realmente no lo entendían.

3. El legado de Frei Otto y del Instituto de Estructuras Ligeras.

3.1. Los trabajos del instituto estuvieron muy influidos por la personalidad y la capacidad de liderazgo de Frei Otto. ¿Cuál era la forma de trabajo que se desarrollaba entre él, los colaboradores y los estudiantes ?

La forma de trabajo estaba muy marcada por Frei Otto. Él decía cómo había que afrontar cada tarea, y los colaboradores simplemente lo seguíamos, estaba fuera de lugar cuestionar las directrices por él marcadas y plantearse otra forma distinta de abordar el trabajo. Sólo había una manera, la de Frei Otto. Cuando se trabaja con un genio es difícil plantearse si esa manera es la correcta o no. Por otro lado él supo estimular a otras personas, y entusiasmarlas con sus trabajos. Tenía un carisma muy fuerte como líder. Sus visiones de la arquitectura tenían un carácter muy marcado. Todos los temas que se abordaron en el instituto fueron introducidos por él.

3.2. ¿ Ha creado escuela el instituto ? ¿ Se podría decir que ha formado a una generación de ingenieros y arquitectos ?

No creo que se pueda afirmar que Frei Otto y su instituto hayan creado escuela, pero sí que han influido en todos sus colaboradores. Todos ellos están ahora esparcidos por todo el mundo, y muchos de ellos todavía mantienen contacto entre sí, aunque ya no estén trabajando en el instituto, pero yo no diría que se haya creado escuela. También ha influido en muchos otros que no han colaborado directamente en el instituto, principalmente a través de las publica-

ciones, las conferencias o los encuentros que se realizaron, cuya finalidad primordial era estimular.

3.3. ¿ En qué medida tienen continuidad actualmente los trabajos de Frei Otto y su instituto en el campo de la construcción ligera entre los antiguos colaboradores ?

Como he dicho antes Frei Otto y su instituto han ejercido una gran influencia sobre sus antiguos colaboradores, pero no podemos decir que haya alguien que siga trabajando del mismo modo. Frei Otto hablaba siempre de muchas posibilidades, nunca fijaba un camino único, estaba siempre abierto a muchas posibilidades distintas, no habían normas estrictas. Se puede encontrar su influencia en determinadas obras o personas, pero no podemos encontrar ninguna persona ni institución en el mundo que podamos calificar de auténtico sucesor de Frei Otto.

3.4. ¿ Qué otras instituciones del campo de la construcción ligera (IASS, Universidad de Surrey, etc.) han tenido relación con el instituto, y qué posibles influencias se han producido ?

Aunque ha habido relaciones a nivel personal con personas vinculadas a estas instituciones, no podemos decir que hayan habido relaciones o colaboraciones a nivel institucional, tanto durante la época de Frei Otto como después de su jubilación.

4. Tareas actuales.

Los trabajos actuales del instituto están mucho más relacionados con la construcción de edificios. La investigación que se realiza ahora tiene un carácter mucho más aplicado, ya no se realiza el tipo de investigación básica que se llevó a cabo bajo la dirección de Frei Otto. Las cuestiones que ahora se abordan son mucho más concretas: cómo construir un determinado edificio, o cómo resolver un determinado detalle estructural. El área principal de trabajo es el vidrio estructural. También se estudian las estructuras adaptables, es decir las que cambian sus propiedades en función de las acciones exteriores, las que responden o se ajustan activa o pasivamente a las condiciones exteriores.

Con respecto a las obras y proyectos actuales la mayor parte son de la oficina de Werner Sobek¹⁷⁹, como el edificio de cristal donde se encuentra la propia oficina, algunas estructuras de membranas desplegables, algunas redes de cables, algunos pabellones móviles para exposiciones, o aeropuertos, en colaboración con Helmut Jahn.

Por último con relación a la serie de publicaciones *Mitteilungen des IL*, de todos los títulos o volúmenes que estaban previstos sólo queda uno por publicar, el volumen IL 40 titulado "Verzweigungen" (ramificaciones) del cual yo soy el principal responsable. En este momento alrededor de un 70 % del libro está terminado pero todavía no está listo para ser publicado en un futuro próximo.

¹⁷⁹ Werner Sobek es el actual director del instituto. Sobre la obra de esta oficina véase A.A.V.V.: *Beyond materiality : Werner Sobek ingenieure*. Aedes. Berlín, 2002, y también BLASER, W.: *Werner sobek: art of engineering*. Birkhäuser. Basel, 1999.

X.3. Gespräch mit Frei Otto am 7. Juni 2004 im Atelier Warmbronn. (Versión original, en alemán, de la entrevista con Frei Otto).

J. M. Songel: Aus alle die weite und reiche Vielfalt von Aspekten und Möglichkeiten zur Untersuchung, die Ihr Werk und Ihr Gedanke anbieten, habe ich mich in meiner Doktorarbeit auf die systematisierenden, experimentellen und methodologischen Dimensionen Ihrer Arbeit konzentriert. Die klassische Historiographie der modernen Architektur (Benevolo, Frampton, usw.) neigt Ihr Werk in Zusammenhang einer Betonung der Technologie zu setzen, sogar manchmal in Verknüpfung mit den Anfängen des *High Techs*. Ich habe Ihren historischen Beitrag eher in Zusammenhang mit der Leichtbautradition der führenden Ingenieure bei der Tragwerksformsuche mit neuen Baustoffen, mit ihren Überlegungen über die Zusammenhänge zwischen Form und Festigkeit, und mit den rationalisierenden Einstellungen bei den Ursprüngen der modernen Architektur in den zwanziger Jahren betrachtet.

Es ist bekannt, daß Sie eine enge und fruchtbare Verbindung mit Ingenieuren wie Fred Severud, Ove Arup oder Ted Happold gehabt haben. Können Sie bitte mir über diese Verbindung sprechen ? Welche Einflüsse gewirkt haben ?

Frei Otto: Eine wichtigste Beziehung war eigentlich zu einem deutschen Ingenieur, nämlich Fritz Leonhardt, dem Erfinder praktisch der Fernsehürme und Brückenbauer mit dem ich viele Arbeiten gemacht

habe. 1952 bereits und 1953 hat meine Verbindung zu Fritz Leonhardt angefangen. Und als nächstes kam dann die Verbindung zu Ove Arup und dann zu Ted Happold.

J. M. Songel: Wie haben Sie diese Ingenieure kennengelernt, Ihre Verbindungen angefangen?

Frei Otto: Ja, eigentlich ganz einfach, man hat ein Projekt und hat Probleme und redet miteinander. Arup in Beziehung zu unserem ersten Projekt in Saudi Arabien, es war 1965. Gleichzeitig mit Ted Happold, der damals einer der Direktoren von der Abteilung Structures Three war. Und dabei ist es eigentlich geblieben, ich arbeite heute noch mit all den drei Teams zusammen. Leider sind meine engsten Freunde Arup, Happold und Leonhardt tot.

J. M. Songel: Welches Werk oder welcher Anlaß verursachte der Anfang Ihrer Beziehung mit Leonhardt ?

Frei Otto: Das ist eine ganz eigenartige Geschichte. Ich hatte ja in Berlin studiert. Und als ich meine Doktorarbeit schrieb, schon vorher habe ich Veröffentlichungen gemacht. Und ein Karlsruher Architekt, Herr Schelling, hat aufgrund einer meiner Veröffentlichungen in der Bauwelt, den Wettbewerb für die Schwarzwaldhalle in Karlsruhe gewonnen. Dann schrieb er mir, ob ich ihm nicht helfen könne, weil er mich als Spezialist ansah und mein Statiklehrer, das war Helmut Bickenbach, mein Doktorvater, der riet mir, mich mit Fritz Leonhardt in Verbindung zu setzen. Allerdings haben wir das Bauwerk dann nicht ausgeführt, es hat sich ein anderer Ingenieur eingeschaltet, das war Ulrich Finsterwalder. Und eigentlich ist die Schwarzwaldhalle in Karlsruhe ja doch heraus-

gewachsen aus meiner Arbeit, damit auch aus der Raleigh Arena und wurde gebaut bevor die Raleigh Arena gebaut wurde. Das heißt die Imitation war eigentlich vor dem Produkt. Eine sehr eigenartige Angelegenheit.

So habe ich damals Fritz Leonhardt kennengelernt. Und da ich damals auch dann nach meiner Doktorarbeit mit der Zeltbaufirma Stromeyer zusammenarbeitete, habe ich ihn gebeten mir bei einigen Zeltbauten, insbesondere für die Gartenschau 1957 in Köln, bei der schwierigsten Aufgabe, dem Eingangsbogen, zu helfen. Und seit der Zeit hat es immer wieder mehrere Projekte mit Fritz Leonhardt gegeben, wie gesagt.

Dann kamen die Projekte in Arabien bei denen die Engländer besser prädestiniert waren, weil sie immer eine Beziehung zu jenem Land hatten. Ganz logisch aufgrund der geschichtlichen Situation. Denn Leonhardt wollte nicht und war auch nicht so geeignet in Arabien zu arbeiten. Also haben wir diese Arbeiten mit den Engländern gemacht. Also das ist die Herkunft der Beziehungen zu den Ingenieuren.

Zu Torroja hatte ich nur eine briefliche Beziehung. Er hat meine Arbeiten sehr studiert, hatte mich zu einem Seminar eingeladen, das in Paris, ich glaube 1954, stattgefunden hat. Nur, er kam nicht zu dem Seminar, er starb vorher. Also ich habe deshalb Torroja nie kennengelernt, nie getroffen, das war vereinbart, aber wie gesagt, er ist vorher gestorben. Ich habe natürlich sein berühmtes Buch "Logik der Form" gelesen, auf deutsch.

J. M. Songel: Er hatte auch die IASS Vereinigung gegründet. Haben Sie auch Beziehungen zu dieser

Organisation gehabt?

Frei Otto: Beziehungen, ja. Ich war aber kein Mitglied. Weil ich anfänglich mich hauptsächlich mit Membranen beschäftigte und die Organisation ist erst viel später dahingegangen, sich auch mit Membranen und nicht nur mit Schalen zu beschäftigen. Dann erklärte man, daß Membranen auch Schalen seien, da habe ich gesagt, das stimmt nicht, Schalen sind Schalen und Membranen sind Membranen, das ist zweierlei. Aber nun gut, diese sagen wir, Auseinandersetzungen um Worte, die waren immer ein großes Vergnügen. Man darf sie nicht so ernst nehmen.

J. M. Songel: Und in Bezug auf Freyssinet ?

Frei Otto: Ich habe ihn auch nicht kennengelernt. Es gab einen Briefwechsel, besonders zwischen Leonhardt und Freyssinet. Ich habe natürlich Freyssinet studiert und so weiter. Und ich hatte auch einen viel intensiveren Briefwechsel mit Bernard Laffaille, der ja die ersten Blechschalen und Hängedächer gebaut hatte. Dann kam diesen furchtbare Rückschlag dieser großen Schale des Senders Europa Nr.1 in Luxemburg hatte, die ihm kaputt ging. Und er hat sich davon, glaube ich auch seelisch und psychisch, nie wieder davon erholt. Jetzt hat mich einer seiner Nachfahren, seiner Kinder, angeschrieben, da sind einige Leute dabei, um diese Beziehungen wieder aufzuwärmen. Sie waren aber nicht so intensiv, wie man annehmen könnte. Aber ich habe ja in meiner Dissertation auf seine ersten Arbeiten hingewiesen.

J. M. Songel: In Bezug auf Le Ricolais ?

Frei Otto: Mit Le Ricolais habe ich mich getroffen, also den kannte ich persönlich. Es war einmal in

Philadelphia mit Louis Kahn, als ich in Amerika lehrte. Ich kannte seine Arbeiten und wir haben uns, glaube ich gegenseitig ruhig ein bißchen befruchtet. Aber das ist alles. So viel hat es da nicht gegeben.

Ganz anders der Austausch, sehr intensive Austausch, mit Félix Candela, den ich seit 1958 persönlich kannte. Ich bin damals nach Mexiko gegangen. Er hat mir alle seine Arbeiten gezeigt. Auch meine eigene mexikanische Familie hat auch mit Candela bei einer Kirche zusammengearbeitet, mein Cousin. Und, selbst noch 14 Tage vor Félix Candelas Tod, hat er mich angerufen, da wollten wir uns in Paris zu dieser Ausstellung *L'Art de l'Ingénieur* treffen. Aber weder er noch ich sind dazu hingefahren. Ich habe also diese Ausstellung nicht gesehen. Er hatte sich eben dann den Oberschenkelhals gebrochen und war in einem sehr schlechten Zustand, als er mich anrief. Aber den habe ich dann öfter getroffen, er war oft an meinem Institut (Abb. 231), er war auch hier. Also mit Félix Candela hat es einen guten Austausch gegeben. Schwierig war, er hatte keine Aufträge, er konnte nicht wieder in die Praxis zurück. Ich habe versucht ihm zu helfen, aber ich konnte nicht, ich hatte auch nichts zu tun. Also das ist Félix Candela, der ja von Original von Haus aus, ein echter Spanier ist und der Bürgerkrieg hat ihn ja aus dem Lande vertrieben. Ich habe ihn einmal in Madrid getroffen und er hat mir seine alten Punkte gezeigt, wo er aufgewachsen ist, einen langen Spaziergang durch Madrid gemacht.

J. M. Songel: Mit Bezug auf Nervi ?

Frei Otto: Ich habe Nervi nie getroffen. Selbstverständlich habe ich seine Arbeiten gekannt. Ich war auch mehrmals, sagen wir, Konkurrent von

Nervi. Besonders bei einer Einladung für die Sportcity in Kuwait. Da war Nervi eingeladen, Candela und wir. Wir heiß mit Kenzo Tange zusammen. Die Arbeit haben wir in Tokyo gemacht, und diesen Wettbewerb haben wir gewonnen. Das war das einzige Mal, daß ich in Konkurrenz zu Nervi stand. Nicht absichtlich. Ich schätze Nervi unglaublich hoch. Aber wenn man eingeladen wird, dann versucht man, selbst eine solche Kapazität als junger Mann zu übertrumpfen, was gelungen war. Selbstverständlich sind die Bauten von Nervi einsame Spitze.

Es fehlt noch einer: Richard Buckminster Fuller. Ich kannte natürlich seine Arbeiten. Getroffen habe ich ihn zum ersten Mal 1958, als ich Lehrer an der Washington University in St. Louis war. Wir haben uns erst in St. Louis getroffen und dann in Carbondale an der University of Illinois und haben ein langes Gespräch, zum Teil sogar eine heftige Auseinandersetzung in freundschaftlichster Weise gehabt, zum Thema weitestspannende Konstruktionen besonders aus Gitterschalen. Und dann war Fuller öfter in Deutschland, auch an meinem Institut (Abb. 232) und ich habe ihn auch in Beziehung gebracht zur Biologie, insbesondere zur Ordinarischen Biologie an der Technischen Universität Berlin zu Gerhard Helmcke. Er hat sich dann die Arbeiten von Helmcke angesehen, insbesondere Stereomikroskopien von Diatomeen und Radiolarien und Buckminster Fuller ist aufgestanden und wollte in die Stereofotos hineingreifen, er war einfach weg, als er sah, daß die lebende Natur schneller war, als er in Erfindungen. Es war zum Teil sehr lustig, man darf die Sache auch nicht immer zu sehr ernst nehmen. Aber die Verbindung mit Buckminster Fuller hat vielen Menschen die Augen geöffnet und war äußerst wich-

fig. Und ich bin auch dabei ein Buch zu schreiben, wo ich dieses Thema im Detail behandle. Es ist aber noch nicht auf dem Markt.

J. M. Songel: Hat dieses Buch schon einen Titel ?

Frei Otto: Ja, es hat einen Titel, es heißt "Das Netz". Es wird vielleicht im nächsten Jahr erscheinen. Es heißt "Das Netz der lebenden Wesen". "Das Netz der lebenden Natur" kann man auch sagen. Aber das hat nur bei einem Kapitel mit Buckminster Fuller zu tun. Sonst viel mehr mit den Arbeiten der deutschen Biologen um Helmcke herum und um dem Stuttgarter Biologen Ulrich Kull und dem Tübinger Biologen Adolf Seilacher. Diese Beziehung jenes Sonderforschungsbereiches 230, der ja über 15 Jahre bis 1991 oder 1995 existierte. Der existiert nicht mehr. Und auch Herr Kull ist inzwischen emeritiert. So ist diese ganze Forschungs- und Entwicklungsrichtung nicht mehr existent.

J. M. Songel: Es ist im Jahr 1995 offiziell beendet?

Frei Otto: Ja, offiziell. Aber eigentlich schon mit meiner Emeritierung 1991. Auch mein ehemaliges Institut ist ja jetzt in anderen Händen und heißt auch inzwischen anders.

J. M. Songel: Können Sie bitte ein bißchen mehr über Ihre kommenden Publikationen sprechen ?

Frei Otto: Da ist ein anderes Buch, ist in Erscheinung begriffen bei dem Verlag Axel Menges zum Thema "besetzen und verbinden". Der Verlag hat das Manuskript. Ich habe es aber noch nicht freigegeben, das soll im Laufe des Herbstes geschehen. Da geht es darum, um eigentlich topographische Systeme, das

Verbinden, also Straßensysteme, Eisenbahnsysteme, aber auch Kraftsysteme, also Kraftwegenetze, und normale Wegenetze. In etwa auch so oder konzentriert die Doktorarbeit von Eda Schaur, die als IL 39 mit dem Titel "Ungeplanten Siedlungen" veröffentlicht wurde. Dann geht es darum, wie sich rein energetisch Wegenetze entwickeln. Sind ja auch Netze. Also um diese Art von Netzen, Wegenetze von Menschen und Tieren, aber auch von anderen Systemen. Das Manuskript ist bei den Konzepten Nummer 49 und 50 vorab geschildert, die für das Buch aufbereitet worden sind.

J. M. Songel: Und das Buch "Verzweigungen", ich glaube Nr. 40 der Reihe Mitteilungen.

Frei Otto: Da haben Sie recht. Eigentlich sollte, und wollte die Verzweigungen einer meiner Mitarbeiter, Jürgen Hennicke, bearbeiten, der ist immer noch an meinem Institut, aber er ist mit der Arbeit leider nicht zu Ende gekommen. Für dieses Thema hat auch noch gearbeitet, ein Mexikaner mit dem Namen Montero. Ich glaube von der Universität in Mexiko. Leider ist dieses Thema noch nicht zu Ende gebracht worden. Und ich hatte auch nicht die Kraft es zu Ende zu bringen, weil ich mehr die biologischen Themen bearbeitet hatte.

J. M. Songel: Also Sie arbeiten jetzt mehr an der Publikation des Buches "Das Netz"

Frei Otto: "Das Netz", als nächstes kommt dann, das wir es herausbringen, eben wie gesagt das "besetzten und verbinden", also Wegenetze. Während "Die Netze", was ich jetzt bearbeite, geht es um Netze bei Lebewesen, der lebenden Natur.

J. M. Songel: Haben Sie Eladio Dieste kennengelernt ?

Frei Otto: Ihn habe ich leider nie getroffen. Es war sogar einmal geplant, in einer Veranstaltung, daß wir gemeinsam reden, das war bei der neuen italienischsprachigen schweizerischen Universität in der Südschweiz, in Lugano. Und da gab es sogar eine gemeinsame Publikation, aber wie gesagt, Dieste habe ich nie getroffen. Ich habe gerade sogar ein Buch von ihm geschenkt bekommen. Ich finde seine Arbeiten großartig. Ich hätte ihn wirklich gerne einmal getroffen.

J. M. Songel: Dieste ist hier in Europa ziemlich spät bekannt worden.

Frei Otto: Ja, das stimmt. Er ist meiner Ansicht nach nicht bekannt genug. Aber einer meiner ehemaligen Studenten, der heute Ordinarius an der Technischen Universität in München ist, Rainer Barthel, ist ein guter Kenner von Dieste und ich glaube, er macht ihn in Deutschland auch bekannt. Also, so wird sicher das nachgeholt.

J. M. Songel: Mit Heinz Isler haben Sie ja eine enge Verbindung gehabt, nicht wahr ?

Frei Otto: Da verbindet mich natürlich eine sehr lange Bekanntschaft. Isler hat ja sehr viele meiner Entwicklungen und Modellversuche aufgenommen, aber dann spezifisch beim Betonschalenbau verwendet.

J. M. Songel: Er ist auch ein sehr aktives Mitglied der *Structural Morphology Group* innerhalb der IASS.

Frei Otto: Ja, er hat sich da sehr engagiert.

J. M. Songel: Haben Sie irgendwelche Beziehung mit dieser Gruppe gehabt ? Wie finden Sie ihre Tätigkeit ?

Frei Otto: Ach ja natürlich waren Fritz Leonhardt, Jörg Schlaich und Isler sehr aktiv in der Gruppe. Ich wäre es gern geworden, aber wenn mich die Gruppe eingeladen hätte, dann hätte ich das gemacht. Und ich war auch ganz zufrieden, daß sie mich nicht eingeladen hat, denn solche Sache macht Arbeit. Aber mit diesen Kollegen habe ich mich auseinandergesetzt und in wie weit unsere Auseinandersetzung die Arbeit der IASS befruchtet hat, kann ich nicht beurteilen. Auf jeden Fall ist es eine wichtige Organisation gewesen, und vielleicht war es meine Lässigkeit oder Faulheit, daß ich mich da nicht so aktiv beteiligt hatte. Ich hatte halt genug mit meinem eigenen Institut zu tun, das sagen wir nach oben zu bringen.

J. M. Songel: Wir können vielleicht jetzt zur Verbindung mit den rationalisierenden Einstellungen der deutschen Architektur der 20er Jahre eingehen. Also Ihr Vater war Mitglied des Deutschen Werkbundes. Namen wie Gropius und Mendelsohn klangen im Atelier Ihres Vaters.

Frei Otto: Ja, ja natürlich klar, denn er war ja im Werkbund aktiv und kannte auch Mendelsohn persönlich und andere. Ob er Gropius persönlich gekannt hat, das konnte ich nicht mehr feststellen. Aber das war damals kein Problem. Es war eben der Werkbund, der ja 1933, bei der Machtübernahme von Hitler verboten wurde.

J. M. Songel: Haben Sie Gropius persönlich gekannt ?

Frei Otto: Ich habe Gropius, Mies, Frank Lloyd Wright, Erich Mendelsohn und Severud gekannt. Zu Severud hat mich Eero Saarinen geschickt. Und das passierte alles bei meiner großen Studienreise 1950/51 in die USA. Und manche dieser Beziehungen haben bis zum Tod dieser Leute gehalten. Also besonders Gropius und Mies, das ist klar. Und es war sehr schön, war sehr wichtig.

J. M. Songel: Auf welche Weise? Wie würden Sie den Einfluß, die Wichtigkeit dieser Beziehung beschreiben?

Frei Otto: Na die Klarheit der Gedanken. Die Klarheit der Bewegung des modernen Bauens war wichtig. Ich war ja auch ein Jahrzehnt oder mehr Vorsitzender der Freunde des Vereins der Weißenhofsiedlung in Stuttgart, das eine. Ich habe mich aber auch mit der internen Auseinandersetzung im Werkbund und im CIAM auseinandergesetzt gleich als ich aus der Kriegsgefangenschaft nach Hause kam. So hat mich zum Beispiel Wassili Luckhardt und Hans Luckhardt, einer der Pioniere der Moderne in sehr detailliert über die Kämpfe und Auseinandersetzungen in Deutschland informiert. Wobei es zwei Strömungen gab, die eine war mehr so eine sagen wir mal vorweggenommene grüne deutsche Bewegung, die beinahe ins Märchenhafte hineinging. Sie kennen vielleicht die Wurzeln von Luckhardt und Poelzig, auch von Mendelsohn, die weit weg waren von der Stränge der klassischen Moderne. Das hat mich sehr interessiert. Warum und wie es kam, daß dann am Ende der 20er Jahre, eigentlich die eine der beiden Richtungen noch übrig war und man diese eigentlich fantastische Architektur, die ich die "frühe Grüne" nenne, zurückgedrängt hatte. Das war ein Kalkül. Allerdings auch unter sehr starkem Einfluß des damals

einzigsten starken Franzosen in der Bewegung, das war natürlich Le Corbusier, oder ein Schweizer, muß man sagen, der das bewirkte. Das hat mich sehr interessiert. Ich war ja nachher beim, habe ja mitgearbeitet beim Sohn von Hans Poelzig, Peter Poelzig, eine Weile in Berlin. Und kenne diese Auseinandersetzungen in den 20er Jahren. Sowohl von meinen Eltern her als auch durch Gespräche. Aber Gespräche erst nach dem Krieg mit den noch vorhandenen Angehörigen dieser Generation.

J. M. Songel: Es gibt vielleicht zwei Ideen, die mit der deutschen Architektur der 20er Jahre verknüpft sind. Einerseits die experimentelle Methodologie vom Bauhaus, der Vorkurs von Josef Albers, das Experimentieren mit Papier, die Faltung, die Krümmung, die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Form und Material.

Frei Otto: Albers persönlich habe ich kennengelernt. Er lehrte zur gleichen Zeit an der Yale University, ich war 1960 an der Yale University, da hatte er ein Seminar. Das ist klar. Wiederum, meine besondere Beziehung war mehr Richtung Walter Gropius, der mir bei einem Besuch in Berlin, dieser Besuch muß, ich war schon hier Professor aber wohnte noch in Berlin, also müßte so 1965/66 gewesen sein. Gropius baute damals seine Stadt in Berlin, die Gropiusstadt. Da hat Gropius behauptet, ich sei der einzige, der eigentlich legal in seinen, in dem weiterarbeite, eben weil ich nicht vordergründig formal vorgehe, sondern mit Experimenten die Gestalt der Architektur der Zukunft suche. Ich kann schon beinahe sagen Walter Gropius war ein Fan von mir. Beinahe nicht umgekehrt. Doch ich auch von ihm aber, Walter Gropius war sehr genau informiert, was ich tat. Und

sah das als einen, vielleicht sogar als alleinigen Weg in die Zukunft an. Es hat mich schwer beeindruckt. Ich wußte das vorher nicht.

J. M. Songel: Also er hat Sie als ein echter Nachfolger seines Bauhauses, seiner Methodologie betrachtet.

Frei Otto: Ja, so kann man das sagen, ein Nachfolger seiner Grundgedanken. Er wollte nicht eine formale Architektur, sondern eher eine Architektur, die eine Grundbasis in den Naturwissenschaften hat. Anders Mies. Ich habe mich mit Mies van der Rohe ebenfalls gut verstanden. Aber Mies van der Rohe war doch sehr Gestaltsuchend durch Gestaltmachen eingestellt. Mies hat Architekturformen entworfen. Gropius hat nicht die Formen gesucht, sondern das Wesentliche. Das ist der Unterschied zwischen den beiden. Beide natürlich mit Riesenerfolg. Aber doch mit einem unterschiedlichen Weg.

Für mich war eine eigenartige Geschichte. Ich war in der Zeit als Mies den Auftrag hatte die Berliner Nationalgalerie zu bauen in Chicago in seinem Atelier. Mies war schwer krank und seine Mitarbeiter baten mich dazu Stellung zu nehmen, weil Mies sie anscheinend aufgefordert hatte. Und ich habe dann einige Bemerkungen gemacht für ein Problem, was in der Nationalgalerie Berlin, in den Plänen natürlich nur, an dem Modell sichtbar wurde, und habe gemeint man müße das ändern. Wir hatten bei dieser großen Tafel, nur vier Stützen in die Mitte der Dachkanten gestellt. So daß diese Dächer freiauskragend die Tendenz hatten, sich schwer zu verformen. Und ich habe dann vorgeschlagen mindestens zwei Stützen an die Kante, also das Dach auf insgesamt acht Stützen zu stellen. Ja und so

steht es heute noch. Ich habe Mies zuletzt nur etwa ein paar Wochen vor seinem Tod in Berlin bei der Montage dieses Daches getroffen. Und Mies war über diese Entscheidung sehr zufrieden. Das heißt also wir beide sind in vollem Konsens auseinander gegangen. Ich wußte allerdings nicht, daß er so kurz danach stirbt.

Aber die Fertigstellung der Nationalgalerie hat er nicht gesehen. An diesem Tag, der Eröffnung der Nationalgalerie, habe ich dann Walter Gropius zum letzten Mal gesehen, der war nämlich dann da. Aber das sind so kleine Geschichten am Rande. Die sind meiner Ansicht nach für die Architekturgeschichte völlig unwichtig. Aber sie sind interessant.

J. M. Songel: Haben Sie Gropius zum ersten Mal bei Ihrer großen Studienreise 1950/51 in die USA getroffen ?

Frei Otto: Ja nicht ganz direkt. Wir haben korrespondiert. Er hat mir geholfen. Ich war damals Student an der University of Virginia. Er hat mir Briefe geschrieben, hat mich dann eingeführt bei Richard Neutra und Erich Mendelsohn und so, und von dort aus kannte ich dann alle Leute. Ich habe ihn dann später persönlich in Deutschland getroffen. Aber ich war inzwischen längst ein Begriff für Walter Gropius, weil er meine Arbeiten kannte. Ich war auch in seinem Atelier in Amerika in der Zeit, aber da war er gerade nicht da, so sind wir ein bißchen auch anfänglich so immer aneinander vorbeigekommen.

J. M. Songel: Glauben Sie, daß die Erkenntnis der experimentellen Methodologie des Bauhauses hat Sie beeinflußt ?

Frei Otto: Ich kannte sie viel zu wenig. Ich kannte gar nicht so sehr genau und habe es auch nie studiert was das Bauhaus gemacht hatte. Also auch nicht Itten und Debus, der aus diesem Bereich kommt, habe das viel später auch erst kennengelernt. Ich muß sagen, es hat eigentlich gar keinen Einfluß gehabt. Ich bin meinen eigenen Weg gegangen. Auch selbst der Einfluß von Gaudí ist viel später erst gekommen als ich bereits Untersuchungen an Modelle gemacht hatte, schon in der Kriegsgefangenschaft, die man als gaudisch ansehen könnte, ohne daß ich Gaudí kannte. Einfach aus der Logik, daß man diesen Weg gehen könnte. Insbesondere bei der Umkehrung von Zugbeanspruchten Konstruktionen in die Druckbeanspruchten. Das war mir allerdings schon bekannt durch einen Freund in der Kriegsgefangenschaft, der als Bauingenieur diese Umkehrmöglichkeit kannte, also das Entwickeln von Gewölben mit Hilfe der Kettenlinie, ganz simpel, das ist ja seit Hooke und anderen, insbesondere Newton bekannt. Also diese Art der Umkehrung. Und dann habe ich natürlich Gaudí kennengelernt und mit großem Vergnügen seine Arbeiten studiert.

J. M. Songel: Erinnern Sie sich noch an den Name dieses Bauingenieurs der Kriegsgefangenschaft ?

Frei Otto: Ich weiß es wirklich nicht mehr. Es gab noch einen anderen Freund, der mir fehlt. Das war der Leopold Kuhlmann, aber der Bauingenieur, der in meiner Arbeitsgruppe war, den Namen habe ich nicht mehr. Das war eigentlich nur eine Bemerkung. Ich habe mich damals bemüht, das Zeichnen von Kräfteplänen zu erlernen, also die zeichnerische Statik. Und wenn man sich damit beschäftigt, dann merkt

man, daß es die selben Formen gibt mit zeichnerischer Statik, völlig egal, ob es sich nun um Druckbeanspruchte, Zug- oder Biegebeanspruchte Konstruktionen handelt. Es ist nur das Vorzeichen. Also daß man mit einer zeichnerischen Statik Gewölbe entwickeln kann und daß diese Gewölbe identisch sind auch mit den Hängeformen, das war mir bekannt schon in der Kriegsgefangenschaft. Also bestimmt seit Ende 1945. Den Namen Gaudí habe ich viel später zum ersten Mal gehört.

J. M. Songel: Sie haben manchmal von Ihrer Erfahrung beim Atelier Ihres Vaters erzählt, ein Tuch in Gips zu tauchen und aufzuhängen, es erhärten zu lassen und umzukehren.

Frei Otto: Ja, ja, das hat mein Vater gemacht und es gehörte einfach zur bildhauerischen Arbeit. Ja, aber da habe ich natürlich dann versucht die Umkehrformen zum ersten Mal, sagen wir, zu machen. Und damit spiele ich bis heute. Das ist ein wunderbares Spielzeug.

J. M. Songel: Eine andere Verknüpfung mit den rationalisierenden Einstellungen der deutschen Architektur der 20er Jahre wäre die Versuche zur Systematisierung. Wie Gropius mit seinem *Baukasten im Großen* eine Vielzahl möglicher Raumkombinationen bereitgestellt hatte, oder Alexander Klein mit seinen Wohnungsgrundrißtypen, oder Muthesius die Wichtigkeit der Typen als Darstellung des Wesentlichen oder als eine gewisse geistige Einstellung betont hatte, so erscheinen Ihre Systemskizzen als ein Schritt weiter bei diesen rationalisierenden Einstellungen.

Frei Otto: Natürlich habe ich versucht zu systematisieren, um diese Fülle, die beinahe unendliche Fülle der Möglichkeiten allein ein bißchen zu ordnen, insbesondere als ich in die Lehre ging. Damit hatte ich ja an der Hochschule für Gestaltung in Ulm angefangen. Das war mein erster Lehrauftrag. Wie gesagt dann später die Lehraufträge. Den ersten, den ich hatte, den habe ich nicht angenommen, war als Nachfolger von Nowicki, der ja verunglückt war, an der Architekturschule in Raleigh North Carolina, den habe ich nicht annehmen können, weil ich hier zu beschäftigt war. Und dann St. Louis, Yale, Berkeley, MIT, Harvard. Dazu war es notwendig etwas Systematik hineinzubringen. Wie soll man dieses Riesengebiet denn lehren.

Also die Verpflichtung zur Lehre verlangte eine gewisse Ordnung, aber auch wiederum sowohl die Breite als auch die Konzentration gleichzeitig zu betreiben. An einigen Stellen zu konzentrieren auch wirklich Vorstöße in die Zukunft zu wagen, was mich immer mehr interessierte als die Geschichte zu machen. Die Geschichte aufzurollen, habe ich immer als Verpflichtung meiner Kollegen gesehen, die Geschichte betreiben. Aber ich habe immer in meinem Institut mindestens einen Mitarbeiter, Assistenten oder Coprofessor gehabt, der dies gemacht hat. Rainer Graefe besonders, auch Eda Schaur, und Berthold Burkhardt betreibt das bis heute in Braunschweig und das ist eigentlich gut aufgehoben, das machen die sehr ernsthaft, Jos Tomlow in der Lausitz, das funktioniert, das habe ich immer betrieben, aber es nicht zu meinem eigenen intensiven Arbeitsgebiet gemacht. Ich war immer derjenige, der sagte, allein mit Geschichte kann man nicht die Zukunft machen. Die ist wichtig, aus der Geschichte

zu lernen, so weit es geht, aber meine Aufgabe ist für die Zukunft zu arbeiten.

J. M. Songel: Natürlich ist die Rolle der Systemskizzen sehr wichtig nicht nur zur Einteilung und Ordnung sondern auch um neue Möglichkeiten zu erfinden.

Frei Otto: Ja gut, weil man an Dinge kommt, die noch nicht durchdacht waren. Und dann füllt man halt die Lücken. Ich habe das "die systematische Methode des Erfindens" genannt. Aber das ist nur eine Methode. Die Kombinatorik in dem man ein Ding mit dem anderen kombiniert das kann man sehr systematisch machen. Und eine ganze Reihe meiner Erfindungen stammen aus dieser Kombinatorik. Aber die ganz wichtigen Dinge sind nicht daraus gekommen, sondern sie sind meistens aus zufälligen Beobachtungen bei Experimenten gekommen. Manche Experimente allerdings ganz systematisch angesetzt. Also zwischen systematischem Experimentieren und zufälligem Experimentieren habe ich immer gemischt. Beides. Dem Zufall eine Chance geben und immer wieder aber eine Systematik in Betracht zu ziehen. Aber wenn man zufällig etwas entdeckt, nicht so dumm zu sein um es zu vernachlässigen, weil es gerade nicht in die Systematik hineinpasst. Ich bin also überzeugt, ein reiner Systematiker kann eigentlich nicht erfinden.

J. M. Songel: Man muß also auch diese Fähigkeit entwickelt haben, um gut genug wahrzunehmen und zu schätzen, was zufällig vorgekommen ist.

Frei Otto: Und ständig zu beobachten. Ständig die Gestalten der Natur, am Anfang der nicht lebenden Natur, zu beobachten und was da geschieht. Die

Gestalten der lebenden Natur sind viel viel komplizierter, sie sind fast undurchsichtig. Ich habe mich zwar mit ihnen abgegeben, aber die Gestalten der nicht lebenden Natur sind natürlich einfacher zu erkennen.

J. M. Songel: Ich möchte jetzt zu den Anfängen Ihrer experimentelle Methodologie eingehen, also zum Ursprung Ihrer ständigen Grundlagen: das Leichtbauprinzip, das Umkehrprinzip, das Prinzip der Formentstehung aus selbstbildenden Prozessen. Das Segelfliegen, das Modellbau oder Ihre Steinmetzlehre erscheinen als wichtige anfängliche Erfahrungen.

Frei Otto: Das sind natürlich alles Dinge, die so lange her sind, daß es kaum noch wahr ist... Ich glaube auch nicht, daß es so wichtig ist. Denn jeder Mensch hat einen bestimmten Lebensweg, der nicht wiederholbar ist. Und wem nutzt man, wenn man das alles aufwärmt. Das mag interessant sein, aber... ja interessant ist es nicht.

J. M. Songel: Vielleicht der Zwang zum Erfinden und Kombinieren.

Frei Otto: Das war immer ein Vergnügen oder eine Obsession. Ich mußte halt immer erfinden, schon als kleiner Junge. Ich habe dauernd immerzu erfunden. Die komischsten Erfindungen habe ich noch gemacht, die nicht mit Architektur zu tun haben. Ich habe als, glaube ich als sieben oder achtjähriger Bub die Inlinerrollschuhe erfunden. Ich wollte sie auch bauen. Heute sind sie üblich. Es ist natürlich ganz logisch, das liegt in der Luft, nur ist es immer dumm, wenn man das zu früh tut, bevor der Augenblick kommt. Eine Erfindung muß immer zum richtigen Augenblick, am richtigen Ort, den richtigen Mitmenschen vorgeführt

werden. Wenn diese vier Bedingungen nicht stimmen, dann kommt sie nicht.

J. M. Songel: Sie sprechen auch über Ihre Erfahrung als Pilot, die Gestaltung eines Rumpfes für ein Einmannflugzeug als Gitterschale.

Frei Otto: Ja, ja das habe ich. Dann bin ich in die Gitterschalen reingekommen, nicht beim Hochbau, sondern um Segelflugzeugrumpfe zu bauen. Da habe ich mich mit den Gitterschalen beschäftigt. Und habe das natürlich, als ich mich mit der Umkehrung der Formen beschäftigte, als völlig automatisch, als logisch angesehen. So bin ich dann in die Probleme der Gitterschalen gekommen.

J. M. Songel: Im Gefangenenlager bei Chartres erscheinen auch wichtige anfängliche Erfahrungen, wie der Bau einiger kleinen Gewölbe oder die Studie zur Optimierung der Schienenstellung für eine Fachwerkbrücke.

Frei Otto: Da ich eben dann die Möglichkeit der graphischen Statik kannte, war ich nicht zufrieden irgendein Fachwerk zu entwerfen und dann zu berechnen, und habe doch gefragt, dann müßte doch auch aus der Statik eine Form entstehen und dann habe ich dieses sogenannte natürliche Fachwerk entwickelt aus der graphischen Statik. Viel viel später habe ich kennengelernt, daß die gleiche Methode der deutsche Architekt und Ingenieur Laves angewendet hatte so rund um 1820/ 30. Und von ihm existiert sogar noch wohl eine Brücke in Hannover, beinahe identisch mit dem was ich gemacht hatte. Also das war nichts besonderes, das war eigentlich nur logisch, wie man aufgrund einer Statik zu einer Form kommen

konnte. Einfach weil es mir nicht in den Kopf geht, daß man einfach irgendwas hinzeichnet und dann berechnet man es. Es geht ja immer, es läßt sich ja jedes Ding berechnen. Heute nach der Elastizitätstheorie, damals mit der graphischen Statik. Im Prinzip kein Unterschied.

J. M. Songel: Zwei verschiedene Methoden, aber das Problem ist die Optimierung.

Frei Otto: Ja. Das Entstehen von Gestalten aufgrund physikalischer Prozesse. Das ist es eigentlich. Und es gibt eine ganze Reihe von physikalischen Prozessen, aber auch Rechenprozessen aus denen Gestalten herauskommen, die von vornherein eben optimiert sind oder die man iterativ in kleinen Schritten optimiert. Ich habe mich meistens um diese gekümmert, die von vornherein eine Optimierung beinhalten. Und das sind eben besonders die Seifenblasen, die Minimalflächen und Flüssigkeitsformen, die nur in ganz wenigen Formen existieren können, weil sie so sensibel sind. Nur aus diesem Grund. Weil sie in jeder anderen Form nicht existent sein können, sondern nur in einer, wie man sagen kann, optimierten, in Minimalformen. Und das war ein großes Vergnügen, denn da haben wir eine Welt des Unendlichen kennengelernt. Es gibt unendlich viele Membranseifenblasenformen.

J. M. Songel: Aber der Computer heute ein wichtiges Werkzeug zur Optimierung und Formfindung ist. Inwiefern sind physische Modellversuche und Experimente noch heutzutage dazu gültig ?

Frei Otto: Naja man kann doch mit dem Computer nur das berechnen, was eigentlich gedanklich schon da ist. Sie finden nur das, was Sie suchen, das

Ungesuchte finden Sie aber mit dem Computer nicht. Aber Sie können durch freies Experimentieren auch Ungesuchtes finden. Und die große Schwierigkeit ist heute, wenn ich zum Beispiel mit Flüssigkeiten experimentiere, dann schränke ich von den unendlichen Möglichkeiten alles ein, bis auf solche Gestalten, die mit diesen Oberflächenspannungen der Flüssigkeiten machbar sind. Die also Tendenz zur Minimalfläche haben. Wenn ich jetzt mit dem Computer anfangen und dieses Kriterium herausnehmen, dann kriege ich Flächen mit unterschiedlichen Spannungen, Flächen mit Biegemomenten in der Fläche, Schubdruck und alles. Ich kann unendlich viel machen. Ich kann als Künstler beweisen, daß ich jede Skulptur, oder als Architekt, bauen kann, das heißt ich berechne sie mit dem Computer und mache dann die Dimensionen, die Dicken oder die Eiseneinlagen in Beton dann dem Ergebnis der statischen Computerberechnung adäquat. Das heißt, ich finde keine Formen sondern ich mache eigentlich die Formen. Der Computer tut nur so, als hätte er die Formen gefunden. Da aber unendlich viele Formen so machbar sind, hat sie der Mensch, der hinter dem Computer sitzt, eigentlich gemacht und nicht gefunden.

Das ist ein großes Problem, was die meisten derjenigen, die heute nur mit dem Computer arbeiten nicht sehen, weil das Denken in unendlichen Möglichkeiten so unglaublich schwierig ist. Ich kann alles denken, kann heute alles mit dem Computer berechnen, kann überall sagen, diese Form hat unser Computer gemacht, ist eigentlich im Grunde eine Lüge, es hat der Künstler oder der Mathematiker gemacht, der hinter dem Computer sitzt, der nur diese Berechnungsmethoden dann so anwendet, daß er irgendetwas herausbekommt, was ihm gefällt.

Wo er mit seinem künstlerischen Sensorium da herangeht. Das ist ein Problem. Ich wehre mich nur gegen die Lüge, daß man behauptet, man habe alles mit dem Computer gefunden. Neue Erfindungen kommen da nicht heraus. Es kann ja nur das herein, wie sagt man, put in put out, nicht wahr? Was du in den Computer reinschmeißt, kannst du auch wieder raus-holen.

Eigentlich werden alle Dinge mit dem noch viel leistungsfähigeren Computer, unserem Gehirn, gemacht. Der viel viel besser kombinieren kann, alles miteinander, zwar unscharf und ungenau und sehr häufig dumm, aber er kann es. Deshalb sind diese nur Computerberechner eigentlich die ganz Dummen unseres Berufes.

Also erstens muß ich sagen, ab 1965 jeder Bau, den ich machte selbstverständlich mit dem Computer berechnet worden ist. Das ist eine Selbstverständlichkeit, braucht man gar nicht drüber reden, das tut man heute. Also Ihre Frage war, findet man die Form mit dem Computer?

J. M. Songel: Ja, die Frage war nach der Gültigkeit heutzutage der Modellversuche zur Gestaltfindung und das auch in Verbindung mit Ausbildungszwecken, also auch als didaktisches Werkzeug.

Frei Otto: Das ist nun was ganz anderes. Wie bringt man es seinen Studierenden bei, das ist sehr sehr schwierig. Aber ich will Ihnen noch etwas sagen, wir bewegen uns hier sogar auf einem gefährlichen Terrain. Ich habe gerade eben an einer Arbeit ein Problem gerade auf dem Gebiete der Gebäude, die

hoch sind, die zusammenfallen können. Also besonders die Schalen und Gewölbe, die können ja alle in sich zusammenfallen. Sind unsere heutigen Computerprogramme gut genug, um deren Zusammenfallen aus plötzlichen Geschehen zu verhindern ? Meine Antwort ist nein. Ich mache mir Gedanken dadrum, weshalb kürzlich in Paris, davor in Moskau, davor dreimal in Deutschland, Schalen ganz plötzlich zusammengefallen sind, die eigentlich richtig berechnet waren, mit Computer und allen Schikanen, die auch geprüft wurden. Zwar behaupten die Politiker immer, sie ziehen die Verantwortlichen zur Rechenschaft, sie werden sie nicht zur Rechenschaft ziehen können, sie führen die Computerprogramme vor, die sind alle richtig berechnet, nach der Elastizitätstheorie.

Da kann man fragen, weshalb unsere mittelalterlichen großen Baumeister die romanische und gotische Gewölbe gebaut haben, und selbstverständlich auch Gaudí und andere, die nicht diese Rechenmethoden hatten, warum konnten sie stabile Gebäude bauen und warum passiert es heute, daß trotz all diesem riesen Arsenal von Computern, diese Fehler passieren. Fehler im allerengsten Kreis, derjenigen Menschen, die sich damit beschäftigen oder ihrer Studenten, Schüler oder Imitatoren, die etwas machen wollen ohne das wirklich verstanden zu haben. Es sieht so aus, als seien die Modelle der Stabilität, daß also ein Gebäude einfach zusammenfällt, also ein Betongebäude, das es aufreißt und zack weggeht, nicht bisher ausreichend durchdacht.

Nun ist die Frage, wie soll man es machen, wir haben immer die beiden Methoden gehabt. Weshalb hat Fritz Leonhardt, weshalb hat Ove Arup ein Labor

eingerichtet, ich für Leonhardt praktisch kooperierend in Stuttgart mit meinem Institut, er hat noch ein zweites Institut, damals 1964 für Modellstatik gegründet und ich habe für Ove Arup in London das Institut eingerichtet, ich war praktisch Direktor des Modellbauinstituts bei Ove Arup. Das sind die gleichen Jahre, wo es mit der Computerberechnung anfangt. Nämlich 1965 fing das richtig an. Er hatte erkannt, daß es nicht ausreicht, sich auf die Rechnung zu verlassen, weil es sein könnte, daß da Phänomene da sind, die nicht ausreichen.

Das interessanteste Phänomen ist das Knicken und Beulen von Flächentragwerken. Haben Sie ein Blatt Papier? [ein Blatt Papier wird auf den Tisch senkrecht auf eine Kante stützend gestellt] Sehen Sie, das ist ein Phänomen. Wann knickt ein Blatt? Es ist doch hinterher ganz. Mit dieser Art des Ausknickens, mit dem sich ja Euler beschäftigt hat, geschieht in einem Bereich, wo man von Spannungen überhaupt nicht reden kann. Da ist ja keine Spannung drin, ein bißchen Eigengewicht, nichts. Nun gucken Sie sich die Eulerformel genau an. Euler ist davon ausgegangen, daß die Verformung mit einem kreisförmigen Gebilde anfangen können, da ist dieser berühmte Buchstabe π hereingekommen, in dieser Rechnung. Ja, wie macht man das Knicken, eigentlich, aufgrund von Versuchen.

Eins der wichtigsten Methoden war das Omegaverfahren, ich weiß nicht, ob Sie das kennen. Der Omega ist ein Faktor, mit dem man die Spannungen erhöht, weil die Form schlank ist. Damit kann man gut hinkommen und ist man einige Jahrzehntelang hingekommen mit dem Omegaverfahren. Heute rechnen alle Ingenieure damit. Damit kann

man sogenannte erste Ordnungen rechnen, einfach mit dem Omegaverfahren. Man macht einen Multiplikator, der aufgrund von Versuchen, aber höchst einfachen Versuchen, entstanden ist. Mein Statiklehrer, der Bickenbach und ein anderer, der für die deutschen Vorschriften der 30er Jahre verantwortlich war, hat mir das sehr genau erklärt, daß also Faktoren gefunden wurden, mit denen man multipliziert die Spannungen, damit man es in dieses elastische Spannungsmodell reinbringen kann.

Aber warum fallen uns den Bauten? Die sind alle, an keiner Stelle sind die Bauten über die Grenze hinaus belastet. Die fallen zusammen, obwohl sie ganz sind. Beim zugbeanspruchten Bereich spielt das natürlich keine Rolle, der pendelt sich ein bis er wieder stabil wird. Auf der druckbeanspruchten Seite, wenn es ausknickt, bums, geht's weg. Sehr gefährlich, schlagartiger Zusammenbruch, und die letzten beiden großen Einfälle, ich habe keine detaillierten Informationen, ich habe nur das was in den Zeitungen und im Fernsehen zu sehen war, ganz deutlich Gitterschalen verglast. Natürlich mit falscher Form, das kann ich gleich sagen. Keine Schalen ohne Biegung. Wenn die über eine gewisse Deformation hinausgehen, sind sie instabil. Und wo ist die Computerberechnung die das verhindert?

Als wir die Multihalle Mannheim bauten, haben wir selbstverständlich auch, und zwar hat Arup und Happold, die waren ja gemeinsam mit ihren Büros da dran, und selbstverständlich auch modellstatische Untersuchungen gemacht. Da kommt man näher, selbst wenn diese Versuche einfach sind, weil man diese Gebilde doch nachstellen kann und vor allen Dingen Gefahren erkennt, die auftreten kann. Heute

machen viele Leute, dann machen sie unter Spannungen so wie Schuchow schon in Moskau umgebaut hat. Aber wehe sie haben innere Verspannungen und es gibt eine kleine Verformung, dann ist die Verspannung weg, die ist nicht da. Also die Schalen werden viel zu dünn gebaut. Und das Problem wird an der falschen Stelle gesehen. Man meint, daß man als Flächentragwerk die Stabilität hineinbekommt, die Hauptstabilität entsteht durch Dicke, nicht durch Versteifung in der Fläche. Und das sind die Auseinandersetzungen, mit denen wir heute zu tun haben. Und meiner Ansicht nach reicht eine Computeranalyse nicht aus. Vielleicht wird sie mal ausreichen, wenn entsprechende Verfahren gefunden werden. Ich habe bis heute noch keins gesehen.

Das ist doch wunderbar, dann ist noch mal was zu tun für unsere jungen Leute. Nur sie sind dumm, wenn sie meinen, sie könnten Physiker sein, reine Theoretiker. All das was wir bauen ist angewandte Physik. Und die Statik ist ja ein berühmter Teil der Physik. Und eigentlich gibt es keine Statik heute mehr sondern nur noch Dynamik und alle Leute nennen sich ja auch so, dann sollen sie aber die Dynamik in den Bauten, jeder Bau verformt sich ja bei Belastungen, noch genauer behandeln. Und das wird selten getan. Was passiert, wenn Bauten sich verformen, können sie bei der Verformung instabil werden. Und das verlangt, meiner Ansicht nach, noch eine Generation von Genauigkeit bei der Berechnung, auf der einen Seite, und verlangt auch die Prüfung auch in der Wirklichkeit.

Unser Bauwesen krankt daran, daß unsere Bauten, wenn sie gebaut sind, nicht geprüft werden. Sie lassen sich ja gar nicht prüfen. Sie können doch

keinen Betonbau prüfen, wie sich die Spannungen verteilen, die Sie errechnet haben. An meinen Membranbauten kann ich das, in einer Membrane kann ich die Spannung messen. In einem Seil kann ich die Spannung messen. Aber nicht bei Betonbauten und auch nicht bei Ziegelbauten. Ich kann Spannungsveränderung messen durch aufkleben von Spannungsmessern, die Veränderung, aber nicht die Spannung. Ich weiß, ob hier da eine Veränderung ist, aber ich weiß die Spannung nicht, wo ist der Nullpunkt ?.

Also es ist ein großes und heikles Thema. Eigentlich ist alle Spannungsanalyse bisher ungenau oder sogar unseriös zu behaupten man könne Spannungen in Gebäuden berechnen. Die Berechnungen sind nur Methoden einer großen Abschätzung. Spannung bis nach dem Komma zu berechnen ist völliger Unfug, weil man sie doch nicht mehr als plus minus 10% herausbekommen kann. Ist ja auch nicht nötig, denn wir kennen ja nicht einmal die Belastungen. Wer kennt Wind- und Schneelasten ? Und die heutige junge Generation kümmert sich nicht mal um die Belastungen, sondern nimmt sie aus irgendeiner Formel heraus, die rein theoretisch ist. Auch ich habe es nicht fertig gebracht meine Mitarbeiter anzuregen, sich mal wirklich echte Gedanken über Schnee auf Gebäuden zu machen oder Wind an Gebäuden. Und wie schwierig sind dabei Versuche.

Also das was physikalisch in Bauten geschieht, sind große Unbekannte. Es ist nur die Frage, wie kann ich die Unbekannten bekannter machen. Zwei Methoden, durch Berechnung, die andere Methode durch Prüfung der Bauten oder durch experimentelle

Prüfung an Modellen. Weil ich im Modell schon manche Ergebnisse kriege, nicht aus dem ganzen Bau. Ich kann nicht erst eine Hängebrücke bauen und dann die Seile messen ohne vorher berechnet zu haben, denn wenn ich feststelle, daß es nicht stimmt, ist das nachträgliche Verstärken sehr teuer. Bei vielen Bauten geht ein nachträgliches Verstärken gar nicht. Insbesondere wenn er zusammengefallen ist, wie jetzt in Paris.

J. M. Songel: Manche Ingenieure stellen in Frage die Übertragung der Ergebnisse der Modellversuche zur Wirklichkeit. Was im kleinen Maßstab gültig sei, solle nicht notwendigerweise auch im großen Maßstab gültig sein.

Frei Otto: Gut, aber da gibt es doch ganz einfache physikalische Formeln und Regeln. Die Modellgesetze muß man natürlich kennen, wenn man Spannungsmeßmodelle oder Kraftmeßmodelle baut. Das ist ja nur ein Gebiet. Wir bauen doch Modelle, um die Form kennenzulernen und dann, wenn wir die Form haben, auch Modelle um kennenzulernen, was in denen passiert. Die interessantesten Modelle sind natürlich die, die Gleichformen entstehen, die optimiert sind durch die Art des Modellbaus. Das ist klar, das ist das ganz Besondere mit dem ich mich beschäftige habe. Vor die Modelle schon etwas bringen, was baubar ist. Hinterher die Analyse, daß man beweist, mit Modellen, daß es baubar ist, das ist ein anderes Gebiet.

J. M. Songel: Können wir das in Bezug auf ein bestimmtes Werk sehen, wie zum Beispiel das Olympiadaach in München? Da gab es einen wichtigen Maßstabssprung im Verhältnis zur vorigen Erfahrung in Montreal. Jetzt der Maßstab war viel größer.

Frei Otto: Nein, nur der Bau war größer. Der Bau war größer, aber nicht einmal die Spannweiten, es waren ungefähr gleiche freie Spannweiten darunter, also die beiden Bauten sind physikalisch sehr ähnlich. Mit gleichen Methoden, Stahlseile gebaut, einstellende weitestgehend alle Minimalflächen, wenn man unter Minimalfläche die geringste Fläche innerhalb des Rahmens oder bi-achsiale Flächenspannungen bezeichnen will, waren die beiden zu sehr ähnlich. Und beide haben wir sowohl berechnet, Montreal sehr sehr einfach, auch schon mit einer Computerberechnung, aber sehr einfach, München zum teilweise komplizierter wie bei der Sporthalle, die Schwimmhalle wurde genauso durchgeführt wie in Montreal und das Stadion war eine Mischung zwischen Computerberechnung und Modellbau.

Und was kann man mehr tun als auf beiden Beinen stehend zu kontrollieren, den Formentstehungsmodellbau zu machen und später die Spannungsprüfung im Modell und in der Wirklichkeit, denn wir haben die Kräfte in der Wirklichkeit gemessen. Eine der wenigen Bauten nach Montreal, wir haben jedes Seil gemessen. War wohl der erste Bau wo wir wirklich wußten, wo was drin ist. Auch die Gefahren kannten wir, die ausgehen konnten bei Überlastungen und auch das, als wir den Bau überlastet haben, war sonnenklar, was da passiert. Eigentlich wie nie ein Bau zuvor. Ich habe es nicht mal mit dem Atelier gemacht. Ich habe die Spannungen hier drin nicht gemessen, zu faul. Und weil es nicht geht.

J. M. Songel: Ich möchte zurück zu dieser wesentlichen Frage, die die Ingenieure in Bezug auf der Übertragung vom kleinen Maßstab zum großen Maßstab stellen, besonders bei den Formentstehungsmodellen.

Frei Otto: Das ist ganz einfach, wenn Sie beispielsweise ein form- und materialgleiches Modell haben und es gleicherartig belasten, sind die Verformungen im Modell linear zu denen in Wirklichkeit. Das ist die Grundbedingung. Jetzt geht es nur darum, schaffen Sie das im Modell so zu bauen? Das sind oft sehr teure Modelle, die Sie dann machen müssen. In Beton ist es sehr schwierig. Mein Kollege Müller hat ein Spezialmodell in Beton hergestellt. Beton können Sie nicht einfach so verkleinern, da müssen Sie alle Aggregate verkleinern. Ein Korn dann auf 1 zu 100 bringen. Sehr schwierig, aber es geht. Es ist nur die Frage, wie genau können Sie das Modell bauen, zeigt nicht schon ein ganz einfaches Papiermodell a la Torroja Ihnen die Gefahren auf, die gerade bei Instabilität drohen?. Natürlich zeigt es das, dann brauchen Sie nicht so ein teures Modell zu bauen.

Das ist die Frage, es ist eine Frage, die man nur im Detail beantworten kann. Die Grundprinzipien des Modellexperimentes sind bekannt. Deshalb gibt es eigentlich die Frage nicht. Darf man oder darf man nicht. Selbstverständlich darf man, ist die Frage, muß man. Sind die Berechnungen sicher genug, daß man den Mut haben kann, nur zu rechnen ?. Es gibt da die experimentelle Physik, und die theoretische Physik. Kein theoretischer Physiker, der durch Nachdenken und Mathematik zu Erkenntnissen kommen kann, traut sich ein Ergebnis seiner Arbeiten herauszugeben, zu veröffentlichen, wenn er sie nicht durch Versuch bestätigt hat. Einstein hat es versucht, gemacht auch, ist doch eigentlich zu seiner berühmten Formel gekommen auf Ergebnissen von Versuchen, dann hat er gerechnet, dann wurde bestätigt. Es ist unseriös, ganz simpel unseriös, Erkenntnisse herauszugeben ohne Bestätigung. Und zur Zeit haben meiner Ansicht

nach, einige Computerberechnungsprogramme von Bauten nicht die physikalische Bestätigung. Es ist die Situation. Deshalb können heute durchaus Bauten kollabieren, zusammenfallen, Menschen töten, daß die Ingenieure dann zu Mördern werden. Sie werden dann natürlich nicht zu Mördern, weil man ihnen keine Absichten unterstellen kann, außer Dummheit. Ich unterstelle vielen heutigen Ingenieuren, die Computerprogramme oberflächlich benutzen, Dummheit. Sie sind nicht sorgfältig.

J. M. Songel: Das Problem ist die Theorie zu prüfen, die hinter dem Programm ist.

Frei Otto: Aber selbstverständlich, ansich macht es der Prüfstatiker. Und der Prüfstatiker sollte eigentlich immer andere Verfahren verwenden. Er sollte mit einfachen Verfahren, aber auch die einfachen Rechnungen manchmal geht es nicht. Eigentlich müßte der Prüfstatiker zu mindestens einen kleinen Modellversuch machen. Manchmal aus ganz primitiven Modellversuchen kriegen sie ja heraus, daß es nicht stimmt. Nur werden die nicht gemacht, weil die Leute meinen, daß dieses tolle Computerprogramm sie schon auf die sichere Seite bringt. Sie denken nicht. Aber das ist das heutige Problem, hat mit der Vergangenheit eigentlich nichts zu tun.

J. M. Songel: Es ist auch interessant zu bemerken, wie die führenden Ingenieure des 20. Jahrhunderts, Maillart, Torroja, Freyssinet... jeder auf seine eigene Art, diese physischen Prüfungen immer gemacht haben.

Frei Otto: Und jeder hatte eigene Einstürze von Bauten. Freyssinet sind einige Sachen eingefallen. Laffaille der

berühmte Einsturz. Mein Professor hat mal uns Studenten gezeigt, der Lebensweg eines guten Ingenieurs sieht so aus, nach oben, dann ist er weg. Oder so, dann schafft er es gerade, das sind die Einstürze, die er hatte, und da oben ist er an der Spitze. Nur wird darüber nicht geredet. Weil, wenn darüber geredet wird, kommt die Justiz und sperrt die Leute ein und das wollen sie nicht. Wiederum, wenn es nicht gemacht wird, gibt es keine Erkenntnisse. Also muß dieses Wagnis eingegangen werden, und da ist die Frage, ob fahrlässige Tötung oder Tötung aus Dummheit vorhanden ist. Aber das ist das heutige Problem. Aber das war immer. Dieses Problem gab es immer.

J. M. Songel: Das alles gehört zur einer selben Tradition, nämlich der der großen Bauer, Ingenieure, Architekten, führenden Baumeister, die immer dieses physische Gefühl des Bauens gut gebildet hatten.

Frei Otto: Das waren immer mehr die Architekten. Seitdem es die Trennung von Architekten und Ingenieuren gibt, haben sich natürlich die Architekten mehr auf das Gefühl oder das Durchdenken von Konstruktionen und Strukturen beschäftigt, während die Ingenieure immer versucht haben zu rechnen. Während ganz simpel beides notwendig ist. Ich bin also, ich stehe auf der Seite der Ingenieure genauso wie auf der Seite der Architekten. Es gibt ja keine Trennung. Jede Trennungsmöglichkeit ist falsch. Die experimentelle Physik ist ebenso wichtig wie die theoretische. Und es hilft nichts dadrüber, das muß hinein. Auf dem Gebiete des Erfindens von Konstruktionen sieht die Sache ganz anders aus. Das ist bis heute immer noch Kopfarbeit, das Erfinden von Konstruktionen. Sie können, wenn Sie sich vor den Computer setzen, keine neue Konstruktionen erfinden,

der zeigt Ihnen nur die Unendlichkeit der Möglichkeiten des bis heute erfundenen, das ist ja unendlich, eigentlich brauchen wir gar nichts Neues mehr zu erfinden, Sie können mit dem Computer alles machen. Und dennoch sind unendlich viele Erfindungen möglich und wir sollten sie tun. Aber eigentlich brauchen wir gar nichts mehr zu erfinden. Wir können alle Bauvorhaben auf der Welt heute mit dem vorhandenen Repertoire erledigen. Aber das ist das heutige Problem, das beschäftigt mich. Ich habe Ihnen mehr über das Heute erzählt.

J. M. Songel: Wir haben schon über Ihre experimentelle Methodologie gesprochen. Es gibt verschiedene IL Publikationen die damit sich beschäftigen, wie zum Beispiel das Buch über die Seifenblasen.

Frei Otto: Das ist natürlich alles noch viel zu wenig, da müßten laufend neue Bücher geschrieben werden, langt alles nicht.

J. M. Songel: Wir haben auch über die Gültigkeit der Modelle zur Formfindung gesprochen, und jetzt möchte ich zurück zur Systematisierung der Formen und der Konstruktionen kommen. Jede Generation Architekten hat ständig dieses Problem konfrontiert oder dieses Ziel sich gesetzt, nämlich irgendwie eine ganzheitliche Systematisierung der unendlichen Vielfalt der Welt der Formen und der Strukturen zu erreichen, natürlich auch bewußt der Unmöglichkeit, eine endgültige Systematisierung zu erhalten. Warum setzten Sie sich dieses Ziel, eine Einteilung und Ordnung der unendlichen Formenvielfalt zu erreichen?

Frei Otto: Dieses Ziel habe ich mir eigentlich gar nicht gesetzt. Was unendlich ist, das kann man doch gar

nicht 100 prozentig ordnen. Aber man kann, wie ich Ihnen schon sagte, für die Lehre, um junge Menschen heranzuführen, ist es manchmal ganz gut, man fängt mit einfachen Sachen an, um sie dann an die komplizierte Welt des Unendlichen heranzuführen. Nur aus diesem Grund. Es war aber nicht mein Lebensziel, die Konstruktionen zu ordnen.

J. M. Songel: Wenn wir Ihre Kriterien zur Einteilung und Ordnung der Formen und der Strukturen betrachten, eigenartig erscheint Ihre ganzheitliche Einstellung, Ihr Wille nicht nur die künstlichen Objekte sondern auch die Objekte der Natur einzuschließen, Ihre Suche nach gemeinsamen Prinzipien. Andere Systematisierungen der Formen, wie zum Beispiel die Versuche von Paul Klee oder Tschernichov, erscheinen mehr abstrakt, mehr geometrisch, vielleicht mehr beeinflusst von der Kunstavantgarde des ersten Drittels des 20. Jahrhunderts, während Ihre Kriterien mehr die Suche nach einer engen Beziehung zwischen Form und Festigkeit spiegeln.

Frei Otto: Ich habe Ihre Frage nicht genau verstanden. Aber so wie ich sie erahne, ist inwieweit die Formerfindungen der klassischen Moderne der Architektur oder der Malerei da beeinflussend wirkt. Natürlich habe ich Mondrian und andere gekannt. Ob sie einen Einfluß auf meine Arbeiten gehabt haben, muß ich mit ja und nein beantworten. Ja natürlich selbstverständlich, wenn addierbare Strukturen erfunden werden sollten, nein aber, wenn es sich um Experimente bei physikalischen Prozessen handelte.

J. M. Songel: Ja, die Frage war mehr an die Ursprünge Ihrer Kriterien gerichtet. Also zum Beispiel ob die

Kriterien "positiv", "negativ", "Hohlräume", "Hohlkörper" vielleicht aus den Pneuexperimenten herausgekommen sind. Oder ob die Kriterien "Spitzen und Tiefpunkte", "die Kante", "die Ecke" vielleicht aus der Erfahrung mit Netzen oder Zelten stammen.

Frei Otto: Nein, das waren rein logische Überlegungen, die ich eingestellt habe, aber ich glaube nicht, daß ich da von irgendwelchen Lehren mich habe beeinflussen lassen.

J. M. Songel: In Bezug auf die Multihalle Mannheim, die damals die größte Spannweite der Gitterschalen erreicht hatte. Wie schätzen Sie dieses Werk in seinem Maßstab als Brecher der Spannweitengrenzen der Gitterschalen, als Prüfung der Spannweitemöglichkeiten der Gitterschalen? Sie haben von der Verwandlung eines sehr unsteifen Gitterrost zu einer sehr festen Gitterschale erzählt.

Frei Otto: Das Endprodukt war so, daß ich mich gewundert habe, daß es tatsächlich gelang, diesen Bau zum Stehen zu bringen und er hat ja die eine Prüfung, die wir gemacht haben, eine Belastungsprüfung gut überstanden und steht heute noch, obwohl er doch inzwischen im nächsten Jahr dreißig Jahre alt wird, wenn ich richtig rechne. Es ist der Bau bei dem ich am meisten Angst gehabt habe und es ist der kühnste. Der eigentlich über mein damaliges und vielleicht auch über mein heutiges Wissen hinausging.

Ich bin Ove Arup und Ted Happold und seinen Mitarbeitern sehr zu Dank verpflichtet, daß sie mitgemacht haben. Es wurde natürlich alles richtig berechnet. Der Bau ist richtig berechnet. Und trotzdem wissen

wir, und erahnen wir, welche Schwierigkeiten er haben könnte. Und ich bin dankbar, daß er nie jene Belastungen bekommen hat, die ihn zerstört haben. Er war ja eigentlich nur für die Gartenschau gedacht. Und sicher wird er eines Tages wieder weggenommen, aber man hat ihn stehen lassen und je älter er wird desto mehr beunruhigt mich das. Aber ich weiß nicht wie ich mich verhalten soll, soll ich dem Bauherrn sagen, er soll ihn wegreißen, damit ich besser schlafen kann?

J. M. Songel: Im Bezug auf den Übergang oder die Verwandlung von einer Gitterschale zu bestimmten Stützpunkten. Bei dem Regierungszentrum in Riad, Kocommas, da haben Sie eine Gitterschale mit sechseckigen Maschen und verzweigten Stützen vorgeschlagen. Könnte man diese Stützung wie eine dem Umkehrprinzip anpassendere Entwicklung der Stützungsart für die Gitterschale betrachten? Und warum eine sechseckige Masche und nicht eine viereckige wie die klassische Gitterschale früher war?

Frei Otto: Ganz simpel, weil ich das mal ausprobieren wollte.

J. M. Songel: Aus einem physischen Grund?

Frei Otto: Naja, aus dem Grunde, daß es doch sinnvoll ist, mal zu lernen, was bei einer sechseckigen passiert. Die Gitterschalen der lebenden Natur sind zumeist sechseckig, obwohl in der Technik, die viereckigen viel einfacher zu bauen sind. Ich habe auch bei dem Projekt, was ja nicht ausgeführt wurde, gelernt, die sechseckigen zu meiden, sie sind teuer und sehr gefährlich, weil man den Verbindungselementen besondere Sorgfalt zukommen lassen muß. Sie haben nicht ein Element wo sie sicher sind, daß es durchläuft

so wie in Mannheim. Bei den sechseckigen müssen sie ja stoßen, da läuft ja nichts durch. Bei dreieckigen könnten Sie wieder durchlaufen lassen, nur haben sie unterschiedlich große Maschen. Sie können ein dreieckiges Ding nicht abwickeln, also, das viereckige hat den Vorteil, Sie können durchlaufen lassen und eine einfache Konstruktion. Die sechseckigen sind schwieriger und zur Zeit wollen einige Ingenieure bei einem Bau von mir sechseckige Maschen machen und oder dreieckige, die eigentlich verkappte sechseckige sind, und wundern sich, daß ich nicht so ohne weiteres mitgehen kann. Aber das sind jetzt mal wieder aktuelle Sachen.

In Riad wollte ich das machen, um das kennenzulernen. Und ich hatte das beste Ingenieurbüro der Welt zur Verfügung. Und wenn man Experimente macht, dann sollte man auf der physikalischen Seite die besten Leute haben. Also habe ich es vorgeschlagen und wir hätten es, wenn das Projekt gebaut worden wäre, auch durchgeführt. Und all das kennengelernt, was wir schon bei der Planung entdeckt haben. Ich habe auch meine schönen Baumstützen nie gebaut. Dafür stehen sie im Flughafen Stuttgart (Abb. 234), aber nicht von mir. Sind aber perfekte Imitationen unseres Projektes in Saudi Arabien. Man könnte sagen, daß sie der Beweis sind, daß es geht. Zumindest insofern, daß sie noch stehen.

J. M. Songel: Sie haben einige aktuelle Fragen in Bezug auf Ihre Arbeit mit Ingenieuren erwähnt. Wie sehen Sie dabei die Rolle des Architekten und des Ingenieurs ?

Frei Otto: Das Eigenartige ist heute, so viel kann ich sagen, daß ich eigentlich als nicht Physiker, als nicht

sogenannter Naturwissenschaftler, eigentlich die naturwissenschaftlichen Fragen zur Abklärung verlangen muß. Das sind naturwissenschaftliche Fragen. Sie haben eigentlich mit heutiger Architektur nichts mehr zu tun. Die hatten immer mit Architektur des Mittelalters bis zur Neuzeit zu tun. Erst in heutiger Zeit koppelt sich der Architekt, er will es, oder möchte es, gerne von den naturwissenschaftlichen ab. Da machen Architekten einen großen Fehler. Bauen ist Naturwissenschaft, angewandte Naturwissenschaft. Er will es nicht wahr haben, schiebt diesen Part den Ingenieuren zu und nun muß ich als Architekt wieder von den Ingenieuren verlangen, echte Naturwissenschaftler zu sein. Und die schieben oft diesen Part, irgendwelchen Computerprogrammen zu. Nein, echte Naturwissenschaft verlangt, Entwicklung und Prüfung jeder Sache nach naturwissenschaftlichen Kriterien. Und das ist mindestens die doppelte Prüfung. Und die Nachprüfung dessen, was gerechnet wurde.

Und dann können sie selbst sehen, wie hinterwäldlerisch unser heutiges Bauingenieurwesen ist. Es ist sehr weit entfernt von den Metropolen des Denkens, sehr weit hinten im wissenschaftlichen Bereich des menschlichen Denkens. War mal ganz vorn. Architekten waren mal die führenden Physiker, das wird vergessen. Sie haben die höchsten Bauten, die größten Experimente gemacht, die es überhaupt gab. Heute sind sie doch keine führenden Wissenschaftler mehr und die Bauingenieure auch nicht. Das ist meine Anklage, aber ich rede nicht nur so, der alte Ove Arup hat so geredet, Fritz Leonhardt hat so geredet, heute redet noch Stefan Polónyi, der ja auch aus dieser gemeinsamen Clique kommt, es ist höchst unglücklich, daß Ihr Beruf auf eine so unseriöse

Art auf eine Anwendung von ein paar Formeln abgerutscht ist. Wenn ich am Computer sitze, sind es doch Anwendungen von Formeln. Das langt halt nicht.

J. M. Songel: Ich möchte Sie auch nach Ihren jetzigen Entwürfe und Werke fragen. Ich habe manches über den Entwurf vom Hauptbahnhof Stuttgart 21 gelesen.

Frei Otto: Da haben wir genau die Probleme, die ich Ihnen eben geschildert habe. Wir arbeiten sechs Jahre daran, über sechs Jahre sind wir an der Arbeit dafür und wissen nicht, ob das Gebäude je gebaut wird. Also ich rechne damit, daß ich ihn nie sehe, den Bahnhof. Aus zweierlei Gründen, biologischen Gründen, ich bin 79, der hat 12 Jahre Bauzeit und ich schätze, daß es nicht unter 20 abgeht, weil dann Verzögerungen kommen. Ich hoffe, daß ich das noch erlebe, ich habe vor 2 Jahren Oskar Niemeyer besucht in Brasilien, er ist glaube ich 96 oder so was, kenne auch Philip Johnson, also es gibt manche Kollegen, die werden so alt. Aber ich rechne mir das nicht zu, dafür hat mich der letzte Krieg sehr geschädigt. Ich zeige Ihnen später einiges vom Hauptbahnhof Stuttgart.

J. M. Songel: Wie sehen Sie die Rolle des von Ihnen gegründeten Instituts als Ausbildungszentrum im Leichtbaubereich? Könnte man sagen, daß das Institut Schule geschöpft hat, daß das Institut eine Generation Ingenieure und Architekten beschult hat?

Frei Otto: Beeinflußt ist das bessere Wort, aber auch nur wenige. Das Institut hat Erkenntnisse gefördert, die auch veröffentlicht wurden, die heute eigentlich sogar allgemeines Wissen sind, was oft nicht angewendet wird. Das Institut existiert in der Form, wie ich

es verlassen habe nicht mehr. Es hat wie gesagt, einen anderen Namen, hat auch andere Schwerpunkte unter meinem Nachfolger, der zweifellos eine Koriphäe ist, Herr Sobek. Er macht aber andere Sachen. Die Arbeiten, die ich gemacht habe, werden an dem Institut nicht mehr fortgesetzt. Aber inzwischen gibt es Leute, in anderen Instituten in aller Welt, die das weitertreiben und oder auch nicht. Das Institut für leichte Flächentragwerke, was ich gründete, muß ich sagen, habe ich leider auch zu Ende geführt, weil mein Nachfolger es nicht weitertreibt, weil es meine Fakultät nicht wollte, daß es so weitergetrieben wird. Die meinte, ich sei in viel zu hohen Höhen abgezweigt, man wolle doch endlich wieder reale Dinge am Boden tun. Also ist die Frage nach meinem Institut so eine geschichtliche Frage, wenn überhaupt Geschichte. Aber keine aktuelle. Es geschieht dort auf den Gebieten, die ich bearbeitet habe, nichts aktuelles. Also alles Geschichte.

Das Institut bearbeitet nicht mehr die Weiterentwicklung von leichten Flächentragwerken. Nennt sich zwar noch Leichtbau, beschäftigt sich hauptsächlich mit Ausfachungen von Fachwerken und Energieproblemen, Verglasungen usw. Es ist auch wichtig, es hat aber mit den leichten Flächentragwerken nichts mehr zu tun, es hat andere Aufgaben. Aber ich sage nicht, daß diese neuen Aufgaben etwa wichtiger oder unwichtiger seien, sondern ich kann nur sagen, die Forschung, die ich dort geleitet habe, die existiert nicht mehr. Deshalb ist die Sache vielleicht Geschichte. Aber so ist nun mal das Leben.

J. M. Songel: Sie sind dann Leiter des Instituts bis 91 offiziell gewesen.

Frei Otto: Genau bis 31. März 1991. Mit dem 1. April bin ich ausgeschieden.

J. M. Songel: Aber die Veröffentlichung der Bücher der Reihe "Mitteilungen" wird immer noch fortgesetzt.

Frei Otto: Das Institut verkauft sie noch und es sind noch zwei Veröffentlichungen später entstanden. Die letzte erst vor ein paar Wochen, nämlich Diatomen 2. Ein Buch über Diatomeen, also Kieselalgen – sind Gitterschalen – das ist jetzt erst herausgekommen. Ein sehr schönes Buch. Ich kann es Ihnen hier zeigen. Das haben Sie vielleicht noch nicht.

Meine wichtigste Veröffentlichung, das ist das IL 24 unter der Serie Form, Kraft, Masse, ist auch später herausgekommen. Das war schon weitestgehend gediehen und das Institut hat es mit den Mitteln des Verkaufs dieser Publikationen herausgebracht. Das ist noch nachträglich in meiner Verantwortung. Sie haben natürlich gefragt, was das Institut tut. Das sind Dinge, die ich noch als Emeritus getan habe. Das Institut selber, das muß man eben sagen, hat inzwischen andere Aufgaben. Weil es die Universität und auch die Fakultät so wollte. Warum nicht?

J. M. Songel: Das IL 24 ist also das Buch über das Prinzip Leichtbau, nicht wahr?

Frei Otto: Ja. Das ist eigentlich ein Resümee meiner persönlichen Erkenntnisse auf dem Gebiet des Leichtbaus. Das ist sehr wichtig, weil manches, was Sie hier fragten, gerade nach Modellgleichungen und so weiter, da drin steht. Da steht zum Beispiel die Ableitung meiner Grundformel drin. Ich habe ja eine Formel aufgestellt über den minimalen

Aufwand um Häuser zu bauen. Da gibt es eine ganz einfache Formel.

J. M. Songel: Der "Bic".

Frei Otto: Ja ja gut, den müssen Sie natürlich verwenden. Aber um die Masse festzustellen, den Masseaufwand von Fasern, weil das die höchst belastbarsten Dinge sind, also was könnte die leichteste Konstruktion eines Hauses sein. Eine Frage, die mein alter Freund Bucky Fuller schon mal gestellt hat und hat gesagt, wie effektiv ein Haus ist, ich brauche es nur zu wiegen. Ich habe ihm gesagt, er muß aber mindestens wissen, was er für eine Spannweite hat oder welches Volumen das Haus hat. Also die Frage nach dem Volumen und der Masse, die Antwort habe ich inzwischen. Also so einfach ist das. Steht das drin. Lesen Sie nach.

J. M. Songel: Bei den verschiedenen Publikationen des Instituts es gibt einige Namen Ihrer Mitarbeiter, die ständig auftreten. Früher haben wir schon Rainer Graefe erwähnt.

Frei Otto: Den können Sie gerne aufsuchen. Wäre ganz gut, er ist ja in Innsbruck.

J. M. Songel: Berthold Burckhardt.

Frei Otto: Er ist in Braunschweig, dort Ordinarius, ist zur Zeit Vizepräsident der Universität. Also eigentlich in der aktivsten Position eines Hochschullehrers, praktisch Hauptmanager der Universität.

J. M. Songel: Ewald Bubner.

Frei Otto: Ewald Bubner war Professor in Essen, ist seit letztem Jahr emeritiert, wohnt aber in Essen, ist auch jeder Zeit zugänglich und würde Ihnen auch gerne jede Frage beantworten.

J. M. Songel: Rob Krier, der so bekannt später geworden ist.

Frei Otto. Ja, Rob Krier. Er ist ja Luxemburger und war Bürochef hier im Atelier Warmbronn. Er hat auch alle Zeichnungen für mein Wohnhaus und für dieses Atelier gemacht. Es war überhaupt das erste Gebäude, was er nicht nur gezeichnet hat, sondern wo er auch verpflichtet war, es zu Ende zu führen. Er lebt heute in Berlin, war lange Zeit Professor in Wien. Ich bin ab und zu mit ihm im Kontakt.

J. M. Songel: Es ist auch merkwürdig, die Verwandlung der Formenwelt, die er später benutzt hat.

Frei Otto: Es gibt ja viele, die die Ausbildung als Architekt hatten und durch ihre Ausbildung geprägt sind. Du bist Architekt, haben Ihre Professoren gesagt. Setz dich hin und zeichne etwas auf und dann baust du es. Und ich habe denen gesagt, wir zeichnen gar nichts auf, sondern wir suchen das Unbekannte. Und manche, dazu gehört Rob Krier, wollten irgendwann endlich dieser Vision des Architekten nachgehen, was aufzeichnen. Er ist ein Mensch, der emotional ist. Ich weiß nicht, ob Sie mal einen Vortrag von ihm gehört haben. Das ist eine Show. Ja, er platzte immer vor Energie. Und als ich ihm sagte, eine Stadt kann man nicht entwerfen, eine Stadt kann man nur entwickeln lassen, dann war er natürlich, und das finde ich auch gut, ganz anderer Meinung. Er hat gesagt, eine Stadt muß doch entworfen werden können. Und ich habe

ihm vor zwei oder drei Jahren in Berlin gratuliert, da hat er doch seine Stadt gebaut. Ich weiß nicht, ob Sie sie kennen, Kirchsteigfeld bei Potsdam Brewitz, außerhalb von Berlin.

Er hat da nun alles, natürlich hat er dann Architekten gehabt und so weiter und hat endlich seinen großen inneren Wunsch erfüllt, mal eine Stadt zu bauen, für ihn gab es nichts Größeres, erstmal als Architekt eine Stadt zu bauen. Das ist eine Frage der Sehnsucht und da mußte er natürlich von dem Weg, was ich sagte. Mich interessiert gar nicht so sehr, daß ich wie ein Bildhauer Häuser gestalte, sondern mich interessiert wie die Häuser eigentlich von selbst entstehen und sein müssen. Das ist der Unterschied. Ich mag ihn sehr, wir sind enge Freunde, und wir verstehen uns gut.

J. M. Songel: Gernot Minke war auch am Anfang ein sehr wichtiger Mitarbeiter.

Frei Otto: Er hat aber wenig Kontakt zum Institut gehalten, er hat sich, sagen wir, ein Gebiet, was ich auch anfänglich am Institut betreut habe, nämlich Erdstrukturen, Sand, Lehm usw. zu seinem Eigenen gemacht, ist Lehrer an der Gesamthochschule Kassel gewesen, und ich habe gehört, daß er jetzt auch emeritiert ist. Soll aber durchaus mit seiner Lehre Erfolg gehabt haben.

Es wird Sie interessieren zu wissen, daß es im nächsten Jahr eine große Ausstellung meiner Arbeiten in der Münchner Pinakothek der Moderne gibt. 3000 m², riesengroß. Und die Münchner Technische Universität ist zur Zeit daran eine geschichtliche Aufarbeitung zu machen. Das macht Professor Nerdinger und Professor Rainer Barthel.

J. M. Songel: Können Sie bitte ein bißchen über Ihr kommendes Buch "Das Netz" sprechen ?

Frei Otto: Diese Arbeit enthält eigentlich zwei Arbeiten, eine bezieht sich auf Wegesysteme, Infrastrukturen, und die andere auf die Netze in der lebenden Natur. Aber nicht auf die Einteilung der Netze, sondern welche Netze gibt es in der lebenden Natur. Das ist natürlich eine Einheit, die simpelste Einteilung, die es gibt. Aber was macht die Formen, und auch die Darstellung, wie vermutlich die Netze in der lebenden Natur entstanden sind, also Beginn des Lebens usw., und wie sie heute aussehen. Also die Entwicklung heute. Darüber geht es. Ist der schwierigste Text meines Lebens, den ich verfasse. Aber hat mit Ordnung und Einteilung, auch wenig zu tun, sondern um die Darlegung des Grundgedankens, das alle Formen und Gestalten der lebenden Natur durch wassergefüllte Fasersysteme existieren.

J. M. Songel: Das Pneu-Prinzip.

Frei Otto: Ja, der Begriff Pneu, den hatten wir auch auf Wunsch der Biologen in meinem Institut immer benutzt. Ich habe ihn eigentlich durch den Begriff Hydro ersetzt, weil das Wort Pneu und Pneuma vom griechischen her Luft bedeutet, also es geht eigentlich um die wassergefüllten ehemals Pneus heute Hydros der lebenden Natur. Wie sehen sie aus? Welche Festigkeiten haben sie? Wie entstehen ihre Formen? Das interessanteste Ergebnis ist, daß alle, ausnahmslos alle Formen der lebenden Natur nur ein einziges Konstruktionsprinzip haben, und daß eigentlich auch die gleiche Festigkeit und die gleichen Rahmenbedingungen haben. Von einer Mikrobe bis zum Wal oder Elefanten oder Mammutbaum, ein

Prinzip, mehr nicht. Das Prinzip ist das gleiche, die Variationsbreite ist 40 milliardenhafte, so viel Arten gibt es ja. Und natürlich eine neue Interpretation des genetischen Prinzips, das sich nicht allein bei den Atomen, sondern in dem Begriff darunter der Vernetzungen der Großmoleküle suche. Das ist die Arbeit.

Unverändert bin ich der Meinung, daß es bisher ein Fehlweg ist, etwa die Objekte der lebenden Natur direkt nachzuahmen, um daraus Häuser zu machen. Das habe ich nie gesagt. Das halte ich für falsch. Ich meine aber wir sollten die Objekte der lebenden Natur kennen. Auch mit gleichen Maßstäben messen. Denn die Prinzipien der Formentstehung sind auf einigen Gebieten sehr ähnlich. Also zum Beispiel auf dem Gebiet der luftgetragenen Pneus, also der echten Pneus, sind sie ähnlich, nicht identisch. Es ist unwirtschaftlich die Natur als Vorbild zu nehmen. Sie ist nicht nachahmbar, weil sie viel zu kompliziert ist. Sie ist im Prinzip sehr einfach, aber in den Auswirkungen ist sie viel zu kompliziert. Das soll nicht mißverstanden werden. Alle Leute unterstellen mir das, daß ich die Beschäftigung mit der Biologie nur verwende, um eine neue Architektur zu machen, das stimmt nicht. Ich will einfach nur wissen, mit großer Neugier, was Natur ist.

J. M. Songel: Ich habe in meiner Doktorarbeit Ihre Systematisierungen nicht nur einzeln betrachtet, sondern auch in Zusammenhang mit Ihren Experimenten. Deshalb möchte ich ein bißchen mehr über Ihre Modellversuche, Ihre Modellbauten kennen, über die Formen, die Materialien.

Frei Otto: Für mich gibt es da keine Grenzen. Je nach Problemstellung muß man auch die Methoden des

Experimentes erfinden. Da gibt es keine Grenzen, da kann man nehmen was man will. Ob mit Fäden, mit Wasser oder Eidottern oder irgendetwas mit dem sich experimentieren läßt, verwendet werden, ist völlig frei. Wichtig ist, daß man aus den Ergebnissen, Erkenntnisse zieht. Natürlich die tollsten Modellversuche, sind diejenigen, die nicht viel kosten.

J. M. Songel: Können Sie mir bitte etwas mehr in Bezug auf bestimmten Modellen erzählen?

Frei Otto: Ja gut. Wir haben jetzt in den letzten Jahren vier Modelle gemacht, die sich ausschließlich mit dem Modell Stuttgarter Bahnhof beschäftigen. Wir haben hier alleine etwa 300 Modelle mit x-erlei Modellbaumethoden. Für mich sind die Methoden unbegrenzt. Wir finden grundsätzlich speziell für Aufgaben neue Methoden.

Dann zeige ich Ihnen mal, was wir jetzt haben. Das ist aber nur ein winziger Ausschnitt, was alles gemacht wurde. Alles kann ich Ihnen nicht zeigen, die Maschinen oder Geräte mit denen wir Minimalwege gemacht haben und all das. Das kann ich gar nicht Ihnen zeigen, das können Sie recherchieren. Das wird immer dann interessant, wenn mal Anwendungen notwendig sind. Das wichtigste ist für eine aktuelle Aufgabe, das richtige Experiment zu machen. Ich habe früher immer die Experimente viel zu kompliziert gemacht. Weil ich nicht nicht traute einfache zu machen. Ich hatte allerdings auch nicht das Wissen mit dem ich aus einfachen Experimenten Ergebnisse herausholen kann. Daß ich aus einem einfachen Papiermodell die Stabilität einer Schale ermitteln kann, dazu braucht man viel Wissen. Verstehen Sie? Je größer das Wissen desto einfacher kann auch die

Prüfung sein. Für mich waren Modelle immer sowohl Schaffung von Neuem als auch zu gleich Prüfung. Also zeige ich Ihnen ein bißchen was von drin.

Es gibt mehrere Modelle, die in Verknüpfung mit dem Bahnhof Stuttgart sind. Da merkte ich, daß meine Kollegen einfach nicht begriffen haben, was eine Kurve gleicher Krümmung ist. Deshalb sind einige Modelle entstanden um das zu zeigen. Unter denen manches aus mehreren Teilen zusammengesetzt. Und ich mußte beibringen, wie man die Frage eine Punktlast einzuführen in ein Flächentragwerk, kann man eigentlich nur ohne daß hier Spannungsspitzen entstehen, wenn man diese Last mit einem Seil in einer Schlaufe ablenkt, das ist ja die Form, die ich in meinem Experiment gefunden, nicht erfunden, gefunden habe. Und das ist eine Kurve gleicher Krümmung. Fängt an von der ebenen Fläche zum Kreis, absoluter Kreis. Und das ist mit dem Kreis ja verwandt, da gibt es nur einen Kreis, der sich um die Längsachse dreht. Geometrisch ganz präzise Figur. Ein solches Modell hat also nichts mit Modellstatik zu tun, es ist rein geometrisch, ist notwendig in der Lehre. Dazu gehören mehreren Modelle (Abb. 235).

Das (Abb. 236) ist zum Beispiel eine Sechseckmasche, nicht um sie so zu bauen, sondern eine Sechseckmasche, wenn die Teile unter 120° zusammenkommen, dann zeigt es, daß diese Fläche gleiche Spannung hat. Weil nur dann ein Knoten entstehen kann, wenn er winkelgleich ist. Natürlich durch den Einfluß dieses Punktes mit einer Seifenhaut kann ich diese Form ganz exakt das machen. Hier schon nicht mehr ganz so exakt, dafür kann ich sie ja halten, in der Seifenhaut kann ich sie ja niemandem zeigen, die ist nun weg. Die hält ein paar Sekunden. Wenn ich sie versteife, dann stimmt sie nicht.

Es gibt viele andere Modelle, wie zum Beispiel Modelle zur Prüfung der Stabilität. Das sind die schwierigsten Modelle, die gebaut werden können. Dieses Modell ist so gebaut, daß wir die Stützen absenken können, dann steht das frei. Die Frage ist, fällt es zusammen oder nicht. Sind also alles aufgeschnitten. Und wenn es ein echtes Gewölbe ist, dann steht es auch, wie wenn es aus Steinen gemauert wäre.

Newton und Hooke haben bereits diese Theorie aufgestellt, daß die Kräfte in einer Hängeform die gleichen sind wie in einer stehenden Form. Aber ich habe mit einigen Versuchen diese Theorie eigentlich auch mit Modellversuchen untermauert. Ich habe ja schon als Student dieses Modell gemacht, die stehende Kette (Abb. 237). Ich kann also hier auch die Bogenlinie voll einstellen, aber nur bis zu einer gewissen Grenze. Wenn ich die Grenze überschreite, dann fällt das plötzlich zusammen. Wenn also die Stützlinien an die Grenze kommen. Das heißt, ich brauche eine gewisse Dicke.

So gibt es viele Arten von Modellen, die man bauen kann. Auch wie sich zum Beispiel elastisch ein Körper verformt.

Das Projekt Stuttgart haben wir mit dieser Idee (Abb. 238) angefangen, praktisch als Hängedach über die Vertiefung im Boden zu spannen. Das natürlich wieder abzufangen mit dem Auge und dann mit vielen Schritten habe ich dieses Modell (Abb. 239) gemacht. Das steht, das heißt es ist hängend versteift worden, dann kann man es umdrehen. Das war ein sehr großer Schritt, um das zu erreichen. Alle die anderen Modelle, die da stehen sind nur dazu da, um gewisse Funktionen zu erfüllen. Das Modell (Abb. 240)

war dazu da, um dem Architekten und auch dem Bauherrn, praktisch um den Wettbewerb zu gewinnen. Mit dem Modell haben wir den Wettbewerb gewonnen. Um auch festzustellen, wie dann der Innenraum aussehen könnte.

Das größte umfangreichste ist das Modell hier (Abb. 241 und 242). Es zeigt den gesamten Bahnhof von unten gesehen. Die Grundrisse sind hier. Das ist der alte Bahnhof an der richtigen Stelle. Es gilt ja eine Regel. Wenn Sie im Modell etwas flexibel bauen können, dann können Sie es fotografisch aufnehmen oder direkt messen. Wir haben hier beides gemacht. Sie können dazu Photogrammetrie oder auch direkte Meßmaschinen benutzen und dann können Sie es iterativ berechnen. Sie brauchen nicht die Herstellung der Form im Computer. Sie können das rein praktisch von Hand machen. Die Abwicklung Montréal haben wir von Hand gemacht. Wir haben sie hinterher, weil die Berechnungsmethode damals erst anfang, dann berechnet. Und auch bei der Olympiade, haben wir die Schwimmhalle und das Stadion von Hand gemacht. Man braucht dafür kein Computerprogramm. Man kann auch von Hand segeln, ohne Computer. Man kann auch mit dem Computer heute ein Segelschiff fahren. Das ist nur eine Frage der Wirtschaftlichkeit.

Gehen wir auch noch mal zur Erklärung der Kurven gleicher Krümmung (Abb. 243), die ich Ihnen unten zeigte. Da schalten die meisten Menschen bereits ab. Sie kennen den Kreis, aber außer dem Kreis gibt es die Spirallinie, die Schraubenlinie, die sind auch Kurven gleicher Krümmung. Es gibt auch viele, viele andere. Und wir haben versucht, diese Kurven gleicher Krümmung zu beherrschen.

J. M. Songel: So einfach aus einem Metallband mit den Enden verbunden?

Frei Otto: Ja, das kann man so einfach machen. Das muß man natürlich kontrollieren. Man kann die Krümmung auch ungleich machen, aber schon alleine die exakte Kurve gleicher Krümmung erlaubt einem unendliche Möglichkeiten. Genauso wie Sie einen Kreis größer oder kleiner machen können, mit den Radien verschieben, wir können sie größer und kleiner machen. Und wenn Sie die Verbindung verändern, gibt es wirklich unendliche Möglichkeiten. Und die Auseinandersetzung mit dem Begriff des Unendlichen ist sehr sehr wichtig. Das ist etwas, was die meisten Architekten nicht verstehen, daß es für die zukünftige Architektur unendliche Möglichkeiten gibt. Es gibt doch keine Beendigung, will niemand verstehen, er will immer nur sein eigenes Haus machen.

Eine der faszinierendsten Blätter habe ich hier (Abb.244 und 245), das ist eine Computerberechnung dieser Formel, gemacht von meinen Mitarbeitern Bodo Rasch und Jürgen Bradatsch. Und ein Mitarbeiter von denen heißt Gavenat und die Berechnungen sind gemacht worden mit den Formeln auch eines ehemaligen Mitarbeiters von mir Eberhard Haug, war mein erster Assistent hier. Der ist in Frankreich und macht stabile Karrosserien für die französischen Automobilfabriken. Und mit dem Computerprogramm das Minimalfläche also dieselbe Fläche, die wir mit Seifenhaut hervorbringen können, sind hier mit mehreren Varianten und Variationen in diesen Plänen dargestellt.

J. M. Songel: Wie sind Sie zu diesen Formeln gekommen? Durch die Experimente mit Seifenblasen?

Frei Otto: Ja, mit Seifenblasen. Das war 1961. Ganz simpel. Wir haben eine Seifenhaut hingehängt, haben einen Faden genommen – natürlich muß man das Experiment durchdenken – haben die Seifenhaut in dem Faden zerstört und dann entsteht der Kreis, wie ich Ihnen da zeigte, ein absoluter Kreis, haben den Faden genommen, versucht rauszuziehen, und dann entsteht diese Fläche. Jetzt erst kann man sie berechnen. Das heißt sie ist über 40 Jahre unberechnet gewesen, aber es spielt ja keine Rolle. Ich habe nur meinem Kollegen Linkwitz gesagt, man müsse die doch berechnen können, aber wenn er sie nicht berechnen kann, ich baue sie dennoch, es ist ja nicht notwendig, daß ich die Formel kenne. Die Formel ist sehr kompliziert. Man hat sie eigentlich bis heute noch nicht, denn dieses Programm entwickelt diese Formel ja iterativ. Aber das ist der Grundriß davon (Abb. 245). Mit welcher Genauigkeit man an die Dinge herankommt. Fantastisch, es ist einfach fantastisch was da herauskommt.

J. M. Songel: Es ist eine sehr wichtige Frage, ob man die Formel kennt oder ob man baut, was berechenbar ist. Also, Maillart zum Beispiel mit den Schalen, die er in seinen Brücken benutzt hat, die waren Formen, die man zu der Zeit nicht genau berechnen konnte.

Frei Otto: Ja, ja klar. Das hat ein Vor- und ein Nachteil. Gott sei Dank gab es Ingenieure, die mit gemacht haben, wie Fritz Leonhardt. Wir haben eigentlich Dinge gebaut, die nicht berechenbar waren.

J. M. Songel: Torroja auch.

Frei Otto: Torroja auch. Und es ist ja sehr schön. Ich habe manchen Ingenieuren gesagt, wenn ihr nicht rechnen könnt, ich baue doch, weil wenn man sehr genaue Modellexperimente macht und die Formeln für die

Modellgesetze bekannt sind, dann kann und darf ich mit vorsichtig gebauten Modellen durchaus Brücken, Schalen und auch Fachwerke prüfen. Fritz Leonhardt hat ganz komplizierte Brücken mit Grundrissen wie man sie noch nie gebaut hatte für Straßen gebaut. Die einzige Möglichkeit war in den 50er Jahren mit Modellen eine Platte zu nehmen, aus Aluminium oder Glas, und die Verformungen zu messen unter Belastungen. Dann können Sie zurückrechnen auf die akuten Spannungen im Beton, können dann eine Bewehrung machen und können die Brücke bauen. Wenn Sie dann zusätzlich noch die Verformung unter dem Eigengewicht prüfen, und auch noch möglichst Risse Prüfungen machen, dann haben Sie eine gewisse Sicherheit. Man konnte bauen. Heute meinen die jungen Studenten, wenn sie kein Computerprogramm haben, können sie nicht bauen. Oft baut man sicherer mit diesen alten Methoden, wenn nämlich die Programme noch nicht alles beinhalten. Das ist das Problem heute, oder sagen wir, das Problem der letzten 30 Jahre. Ich bin noch ein Baumeister der alten Schule.

Es ist nur die Frage, ob man die Erfahrungen und die Bedingungen vergißt. Und das kann meiner Ansicht nach sehr gefährlich sein. Und man auch sich nicht überlegt, wieso manche Bauten über Jahrhunderte, Jahrzehnte oder Jahrtausende gestanden haben, daß sie stabil sind und heute fällt sofort ein Bau ein, der richtig berechnet ist. Die sind doch alle richtig berechnet worden, die in letzter Zeit eingefallen sind. Die meisten Einfälle haben heute die Gitterschalen, die ich mit entwickelt habe. Weil die Leute, die sie betreiben nicht vorsichtig genug sind.

Übrigens das Modell hier (Abb. 246), ist auch hängend gebaut worden.

J. M. Songel. Aber es wurde geplant, um es mit Stein gebaut zu werden.

Frei Otto: Nein, sondern nur um die Form. Ansich ist es egal. Ich könnte es aus Naturstein bauen. Die gesamten Sachen Stuttgarter Bahnhof könnten wir auch aus Naturstein als Gewölbe bauen. Das Modell wurde hängend gebaut, also umgekehrt. Sind Holzklötzchen, die mit Fäden zusammengehängt sind. Und dann stellt sich diese Form ein. Und wenn ich die Form kenne, ist sie sehr leicht zu berechnen, das ist ja kein Problem.

J. M. Songel: Nochmal die Frage der Sechseckige Masche.

Frei Otto: Naja, es ist eine sechseckige Masche weil ja daran gedacht wird, sie wieder als geschlossene Schale zu machen. Auf dem reinen druckbeanspruchten Bereich, wenn ich nie Biegung habe, darf ich auch das Sechseck machen. Im Beton kann ich durchaus die Kräfte in einer Sechseckmasche sauber auffangen. In Stahl und Holz nicht so sehr, weil Stahlprofile sind dünn und lang und Holz ist immer faserig, Holz ist ein Material, was besser funktioniert als Stahl. Aber Beton ist ein Flächentragwerk. Und eigentlich, um ein Flächentragwerk zu entwickeln, ich kann leicht hieraus eine Rippenschale oder eine durchgehende Schale, ich wollte nur die Form haben. Eine Form, die möglichst spannungsgleich ist. Das kann ich mit einem Sechseckmaterial ja leichter feststellen. Das habe ich Ihnen unten gezeigt. Mit einem Sechseckmaterial kann ich die Spannungsgleichheit feststellen und ein Kettennetz leicht in eine Betonschale umwandeln. Im Modellbau, um die Form einer Betonschale zu finden ist das eine Methode.

Ich könnte das sowohl als Betonschale als auch als Rippenschale aus Natursteinen bauen. In der Gotik hat man solche Gewölbe gebaut, nicht mit dem Loch, den kannte man in der Gotik nicht. Außer bei Einstürzen, da ist das Loch entstanden und die Schale blieb. Ich habe nach dem Krieg das studiert, daß in einigen Gewölben Löcher drin waren und die Schalen nicht zusammengefallen waren.

J. M. Songel: Das (Abb. 247) sind Modelle mit traditionellen Materialien.

Frei Otto: Ja. Diese ganze Sache gehört in das Gebiet der Stabilität. Was ich Ihnen gezeigt habe, das kann man mit dem Klötzchenspiel machen. Ich bin ja der Meinung, auch von meiner Familie, mein Vater war ja, wie Sie wissen, Bildhauer und Steinmetz, mein Großvater auch. Und mein Vater hat sich sehr mit den Methoden der mittelalterlichen Steinmetzkunst beschäftigt. Wie haben die ihre Gewölbe gebaut und wie wußten sie, daß sie nicht einfallen. Denn es gab keine Herren Hooke oder Newton. Es gab die gesamte Mathematik nicht, die wir hatten, Computerprogramme erst recht nicht. Und dennoch wußten sie, wie die Bauten richtig sind. Wir haben heute, meiner Ansicht nach, wieder dieses Wissen, nutzen es nur nicht aus und ich versuche dieses Wissen zu vermitteln, da gehören natürlich auch Modellversuche dieser sehr einfachen Art.

Wir haben das Pantheon mal untersucht, weil mich interessierte, ab wann, bei welcher Horizontalkraft genannt Erdbeben, fällt das Pantheon ein. Und mit solchen einfachen Modellen haben wir das rausgekriegt bei ungefähr $1/3g$, also $1/3$ der Schwerkraft. Also können wir darauf schlie-

Ben, daß Rom nie in den letzten 1800 Jahren ein größeres Erdbeben als 0,3g gehabt hat. Das ist ein schweres Erdbeben natürlich, aber es gibt größere. Im Modellversuch können wir die Dinge kaputt machen. Haben wir auch gemacht. Wir prüfen auch den Bahnhof Stuttgart auf Erdbeben und wissen genau, ab welchem er instabil wird. Jeder Bau wird doch bei Erdbeben instabil. Ist nur die Frage, wie groß ist es.

Und der sicherste Bau ist die Lufthalle. Die kriegen Sie mit Erdbeben nicht kaputt. Die von allen Leute als instabilste angesehene Konstruktionsform, ist in Wirklichkeit die stabilste. Und je weniger eigene Masse sie hat um so stabiler sie ist. Am stabilsten ist natürlich der Bau, der nicht da ist oder der eingefallen ist. Ich habe den Studenten immer gesagt, der kollabierte Bau ist der stabileste. Und der stehende Bau, der Turm, hat ein Maß von Instabilität. Es ist nur die Frage, wie groß können die Kräfte sein, um ihn zum Einsturz zu kriegen. Jeder Turm, jedes Haus ist instabil, im Prinzip. Die ganze Architektur ist ja nur ein vorübergehendes Stabilmachen des im Prinzip Instabilen. Aber das muß man erst begreifen.

J. M. Songel: Vorübergehendes Stabil, während des Lebens des Baues.

Frei Otto: Richtig. So lange ein Bau lebt muß er stabil sein, muß er vorübergehend stabil sein. Und wenn er zusammengefallen ist, ist er stabil. Wenn er am Boden liegt, dann kann ja nichts mehr passieren. Aber mit solchen Gedanken muß man sich natürlich philosophisch beschäftigen.

