

la estructura veloz

A PROPOSITO DE LA OBRA DE EMILIO PEREZ PIÑERO Y FELIX CANDELA

Josemaría Churtichaga



la estructura veloz

TRAYECTORIAS ESTRUCTURALES A PROPOSITO DE LA OBRA DE EMILIO PEREZ PIÑERO Y FELIX CANDELA

Josemaría de Churtichaga

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUCCIÓN : EL SALTO EN EL AIRE | 1 |
| filosofía estructural | 3 |
| 2 ESQUEMA DEL ITINERARIO VELOZ | 3 |
| 3 LA FORMA DE LOS PROBLEMAS | 4 |
| la forma resiste | 5 |
| la forma material | 7 |
| la desproporción del tamaño | 8 |
| los tamaños desproporcionados | 9 |
| la forma de Anoeta: la curvatura salvadora | 9 |
| el acero liberador de los empujes | 10 |
| 4. MALLA, MASA Y SUPERFICIE | 11 |
| el triángulo rígido | 12 |
| la división "ideal" de las cúpulas | 16 |
| la triangulación de Anoeta | 18 |
| 5. EL CALCULO INNECESARIO | 21 |
| 6. LA CONSTRUCCIÓN INEVITABLE | 23 |
| la construcción en movimiento | 23 |
| el hallazgo del hyper | 25 |
| 7. LA ESTRUCTURA VELOZ DE ANOETA | 27 |
| peralte, malla y frecuencia | 27 |
| la triangulación: el hyper multiplicado | 28 |
| coladores desplegados | 29 |
| la plegadura universal | 29 |
| el último salto: un olvido genial | 30 |
| BIBLIOGRAFIA | 31 |

la estructura veloz

TRAYECTORIAS ESTRUCTURALES A PROPOSITO DE LA OBRA DE EMILIO PEREZ PIÑERO Y FELIX CANDELA

INTRODUCCIÓN : EL SALTO EN EL AIRE

La concepción y realización de una estructura reticular es el resultado de una actitud mental ante la naturaleza, que se descompone, analiza y condensa nuevamente en un típico producto manufacturado por la mente del hombre. EPP



FELIX CANDELA OUTERINO
Madrid, España 1910-1997

Existen personas que hacen saltar con paso de gigante el nivel de conocimiento de una época. Félix Candela (1910-1997) y Emilio Perez Piñero (1935-1972) fueron dos de esos personajes, que trabajando en el territorio de la ciencia estructural, trazaron para ella trayectorias geniales de enorme repercusión. Siendo muy diferentes sus orígenes y vocaciones estructurales, sus vidas se enlazaron en 1961, durante la celebración en Londres de los actos del VI congreso de la Unión Internacional de Arquitectos. Durante el mismo, se convoca un concurso para estudiantes de las escuelas de Arquitectura sobre el tema del congreso: "Nuevas Técnicas y Nuevos Materiales en la Construcción".



EMILIO PÉREZ PIÑERO
Calasorra, Murcia, España
1935-1972

fig 1
EMILIO PEREZ PIÑERO
TEATRO TRANSPORTABLE, 1961
Primer premio VI congreso UIA,
Londres, 1961



1

En este caso el tema del concurso era un "Teatro ambulante". Emilio Perez Piñero, estudiante de cuarto curso en la Escuela de Arquitectura de Madrid, y encerrado durante días en la pensión donde vivía, define su propuesta "*resolviendo las cosas conforme se me iban presentando en el proceso de construcción*". El resultado es tan brillante y genial, tan fabuloso e innovador (**fig.1,2**) que el jurado le concede unánimemente el primer premio.

Los asombrados miembros del jurado eran personas tan reconocidas en el campo estructural como Buckminster Fuller y Ove Arup y el propio Félix Candela, que califican sin dudar la invención como una aportación técnica de primer orden.

Desde este encuentro, el maestro Félix Candela y el jovencísimo Emilio Perez Piñero comenzarán un inquebrantable periodo de larga amistad, apoyo y mutua admiración. Separados por la distancia, intentarán fabulosos caminos de colaboración contando con el prestigio en Norteamérica de Félix Candela, que busca para la estructuras de Emilio aplicaciones industriales tan alucinantes como la cubrición de cráteres en la luna... Tras años de contacto y mutuo estímulo, sus vidas se reúnen finalmente en Madrid en 1972, donde deciden unirse profesionalmente hacia un camino prometedor..

A los pocos meses de esta unión, Emilio Perez Piñero, volviendo de visitar a Dalí para quien desarrollaba varios proyectos realiza con su Ferrari su último salto mortal, congelando su espectacular carrera y dejando sobre las mesas de dibujo el primer fruto del recién inaugurado binomio junto a Félix Candela : el concurso no premiado para la cubrición del velódromo de Anoeta en San Sebastián.

En este texto, girando en torno a esta propuesta inacabada, se enrosca la obra y enfoque de ambos personajes en un objetivo último idéntico, en un esfuerzo vital extraordinario a la búsqueda de la forma de los problemas resistentes. Ellos buscaron toda su vida la forma de los problemas, y no los problemas de las formas, en un escurrizado y extraordinario juego con las leyes de la gravitación.

Emilio Pérez Piñero, uno de los mejores y más precoces genios en la concepción estructural del S.XX, y Félix Candela, otro gigantesco y veterano creador , dejaban suspendidas las fabulosas estructuras que hubiera realizado la juventud plegable y reticulada de Emilio Pérez Piñero con la experiencia y sabiduría reglada de Félix Candela.

El objetivo de estas notas estaría cumplido si se advierte al final de las mismas que aquello que persiguieron, aquello que comenzaban juntos era su obra ausente más valiosa. Esa estructura posible y ausente será el objetivo último inalcanzable en nuestro rodeo veloz alrededor del velódromo de sus vidas.

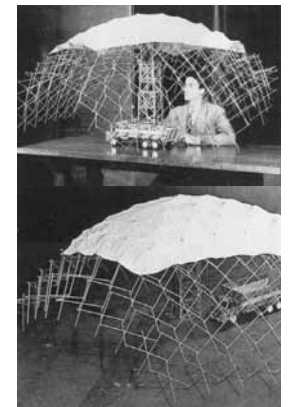


fig 2
EMILIO PEREZ PIÑERO
TEATRO TRANSPORTABLE, 1961
Primer premio VI congreso UIA,
Londres, 1961

demonstración del propio autor de las fases sucesivas de apertura de la estructura desplegable con la cubrición asociada.

2

filosofía estructural

Félix Cardellach publicó en 1910 un extraordinario libro llamado "Filosofía de las Estructuras". En el prefacio del mismo, el autor nos anima:

"...reflexionemos, pues, sobre la naturaleza y función complejas de las formas resistentes de la construcción; refundamos en un mismo crisol la multiplicada y abundosa serie de métodos verificativos que nos ofrece la Ingeniería; analicemos la evolución, influencias y relaciones de los diversos tipos estructurales históricos y modernos, y seguramente encontraremos, sedimentado en el fondo de todo este interesante análisis, un verdadero estrato sintético, un positivo origen de ventajas prácticas en que inspirar nuestro sentimiento ante el problema de la Construcción a que estamos constantemente hermanados."

En su hermoso libro, Cardellach realiza el difícil esfuerzo de ordenar las formas resistentes, de elegir el tamiz a través del cual aquellas queden finalmente clasificadas y se hagan inteligibles en su comportamiento estructural. Rechazando la cronología, el material, la geometría de la forma, encuentra una sutil clasificación,

"bajo principios diferentes basados exclusivamente en lo que podríamos llamar la aptitud que para reaccionar contra las fuerzas externas presentan dichas formas, aptitud que es de orden puramente mecánico....que entraña principalmente el concepto de la constitución o contextura de los miembros constructivos..."

Como buscadores de estas formas de aptitud para reaccionar a las fuerzas exteriores, encontramos toda la obra de Félix Candela y Emilio Pérez Piñero. En el concurso para la cubierta del velódromo de Anoeta, están sumadas dos maneras sintéticas de atrapar los espacios, dos modos idénticos de vencer la gravedad, dos miradas geométricas, dos enfoques poderosamente simplificadores de los problemas estructurales.

ESQUEMA DEL ITINERARIO VELOZ

Para realizar el itinerario estructural propuesto en torno a la obra de estos dos autores, elegiremos una pauta, un tamiz racional para, a través del mismo, entrever el caso del velódromo de Anoeta como ejemplo relacionado, como el último poso o "precipitado" de los grandes temas sobre los que trabajaron en sus trayectorias hermanas.

Este tamiz se encuentra en el texto "Estructuras Reticulares", publicado por Emilio Pérez Piñero (en adelante EPP) en 1968. En él enmarca y analiza las características, evolución, tipos y futuro del sistema reticular. En el se lee:

...en la concepción, proyecto y ejecución de una estructura reticular aparecen las siguientes fases:

1. Determinación de la forma general del conjunto
2. Determinación de la retícula, disposición y longitud de las barras. Esto puede llamarse "cálculo geométrico" de la estructura.
3. Cálculo mecánico y dimensionamiento de las barras.
4. Resolución constructiva de la conexión de las distintas barras.
5. Formación efectiva de la estructura en su emplazamiento con el montaje de sus elementos.

Éstas serán las pautas aplicables en la trayectoria propuesta, que acudiendo a premeditados rodeos atrape la sutil línea que transporta las decisiones estructurales que insinúa la bella imagen de la maqueta para la propuesta de Anoeta. (fig.3)

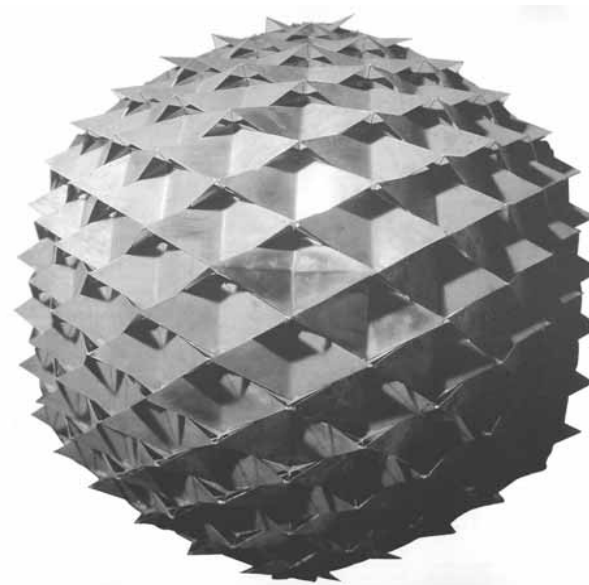


fig 3

EMILIO PEREZ PIÑERO-FELIX CANDELA
Concurso para la cubierta del
velódromo de Anoeta, San Sebastián,
España, 1972

maqueta de trabajo

LA FORMA DE LOS PROBLEMAS

1. Determinación de la forma general del conjunto

En el concepto primero estructura y forma se identifican. EPP

La conciencia de la forma estructural es, junto al material, uno de los temas capitales sobre el que se desenvuelve la ciencia estructural. Félix Candela y Emilio Pérez Piñero hicieron de esta conciencia parte de sus vidas, y es el arranque y levadura de toda su obra.

La forma general de la estructura o "macro-forma", como sabiamente define EPP, será la primera y gran decisión de los problemas. Ella



fig 4

basta una variación en su forma para que una simple hoja de papel alcance por su forma una estimable capacidad resistente.

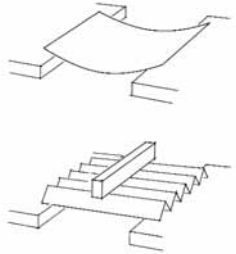


fig 5

basta una variación en su forma para que una simple hoja de papel alcance por su forma una estimable capacidad resistente.



fig 6

POLENI
tratado 1748 sobre arcos.
esquema relación cadena colgante-
antifunicular-arco

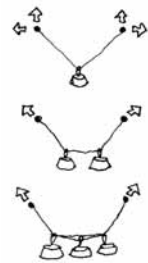


fig 7

esquema formas funiculares. bajo los pesos, el cable adopta la forma çoptima para trabajar como únicamente puede: en tracción.

indicará por si sola una manera propia de enfrentarse a las fuerzas actuantes sobre la estructura, delimitando en su comportamiento el abanico de materiales con que realizarla.

la forma resiste

Así, los problemas estructurales tendrán unas formas, un formalismo aliado para resolverlos. En él, no se buscará resolver los problemas de una forma determinada, sino que el objetivo es encontrar la forma de los problemas. Evidentemente, cuando más precisas y estables sean las fuerzas actuantes sobre la estructura, más definida o "dibujada" quedará pues la "forma del problema". En las cubiertas, especialmente de luces considerables, donde el peso propio es casi el principal problema, este territorio resulta de enorme fertilidad para la investigación del "formalismo resistente".

El ejemplo más elemental de este principio puede observarse tomando una hoja de papel (fig.4). Por si sola la hoja resulta insuficiente para soportar su peso propio. Sin embargo, basta una variación en su forma para que la misma materia dispuesta de otro modo en el espacio alcance por su forma una capacidad resistente nada despreciable. Si la misma hoja de papel se pliega,(fig.5), la capacidad resistente de la nueva forma obtenida se multiplica, lo que muestra un nuevo y sorprendente significado para formalismo.

Para entender una forma resistente tan eficaz como el arco, basta observar un objeto elemental. Una cadena, colgando entre dos puntos, adoptará bajo su propio peso única la forma bajo la cual puede resistir: trabajando a tracción. Cualquier otra fuerza sobre la misma deformaría su trazado y por tanto aquí tenemos un elemento estructural que sólo puede trabajar "estirándose". Como se observa en el dibujo del tratado de Poleni de 1748 sobre arcos, (fig.6) basta invertir la forma de la cadena para obtener un arco en el que las únicas fuerzas actuantes se transmitan a través de su línea con esfuerzos inversos a la tracción: sólo estará comprimido. Este principio elemental de que una cadena se adapte a su propio peso es igualmente válido para el caso en que deba soportar pesos ajenos. Si aplicamos pesos en una cadena (fig.7), esta adoptará diversas formas, que al invertirse, como en el ejemplo de Poleni, mostrarán el perfil del arco "ideal" para esos pesos, (llamado antifunicular de las cargas).

Desde esta sencilla observación puede entenderse perfectamente el sabio "formalismo" de Félix Candela (en adelante FC). Su primera cáscara experimental, realizada en 1949, (fig.8), planteaba todos estos recursos "formales" como elementos generadores de resistencia.

Su macro-forma será una catenaria invertida. De este modo bajo su peso



fig 8

FELIX CANDELA (1910-1997)
primera cáscara experimental, 1949



fig 9

palacio de Ctesifonte, Iraq
Imperio Sasánida s.III dJ.C.
luz de la bóveda=26,3m

propio la bóveda solo trabajará compresión. En este principio tan elemental se basa toda la historia de la construcción abovedada de fábrica, como ejemplos tan impresionantes como el palacio de Ctesifonte, realizado por el imperio Sasánida (fig.9) en el siglo III d.J.C.

Ahora bien, en una estructura de edificación, además de su peso propio pueden actuar otras cargas como el viento, la nieve, las dilataciones térmicas...Además, sabemos que mientras la tracción es una fuerza estabilizante (cuanto más tiramos, mas firme será el cable), la compresión resulta desestabilizante, pues el propio peso puede desestabilizar la forma por la que viaja, del mismo modo que un bastón se dobla bajo nuestro peso (fig.10)



fig 10

la compesión del peso produce el pandeo del bastón, desestabilizando la estructura.

Asi que no basta con trazar un delgadísimo y teórico arco catenario para resolver su cascara. Si se quiere dotar a la estructura de estabilidad para resistir estas fuerzas o tendencias desestabilizadoras, la propia forma tendrá que ser en esta tarea también la aliada. Existen muchos recursos para ello, pero todos se basarán casi sin excepción en el descubrimiento del beneficio formal de la doble curvatura. Ondulando la directriz de la bóveda, (fig.11), se obtiene una forma mucho más rígida y capaz sin aumentar el espesor de la lámina. Es de nuevo el mismo principio de la hoja de papel.

En definitiva, esta sencilla estructura de 1949 sobre la cual Candela se encarama orgulloso contiene todos los recursos necesarios que irá puliendo y desplegando a lo largo de su espectacular investigación en cascarrones. La forma será para Candela un aliado imprescindible sobre la cual incorporará variaciones tendentes a humanizarla, haciéndola más económica, más sencilla de construir, pero también más bella, preocupación eterna de todo verdadero creador.(fig.12)



fig 11

FELIX CANDELA (1910-1997)
Escuela de bajo coste, 1951
bóvedas funiculares con ondulación en su cáscara. De este modo se rigidiza la bóveda sin aumentar el espesor.

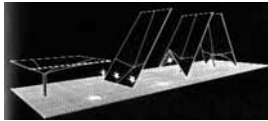


fig 12
FELIX CANDELA (1910-1997)
La forma como aliado resistente.
diversas aplicaciones de una misma
forma resistente



En obras como el restaurante de Xochimilco de 1957, (fig.13), el atractivo manejo de formas elementales regladas para la construcción de esta cáscara de espesor mínimo obteniendo una luz considerable supone un hito en la construcción de cáscaras resistentes. Candela llega así al límite de luz razonable para este tipo de estructuras, que confían en una adecuada forma resistente la disposición cuidadosa del material que la conforma: el hormigón armado.

Su trayectoria laminar tuvo siempre ese hilo conductor: encontrar formas "resistentes" bellas y económicas de construir.

la forma material

En la obra de EPP la forma adquiere un aspecto casi vital y se liga indisolublemente al material que la conforma... "la estructura en la forma es lo que hace posible su subsistencia como tal...en el concepto primero, forma y estructura se identifican..." Para él, forma y material son el primer binomio creador de la estructura, son dos caras de un mismo problema.

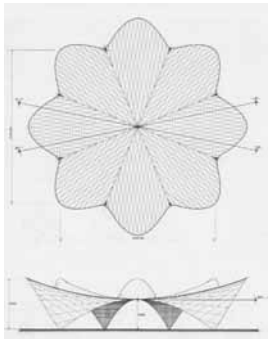
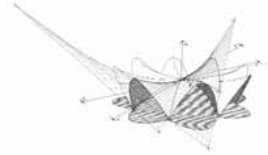


fig 13
FELIX CANDELA (1910-1997)
restaurante en Xochimilco, Méjico.
1957
luz=30m espesor=4cm

En las creaciones de EPP se hace muy evidente que el material tiene implícito una arquitectura posible, un modo de organizarse en el espacio. De igual manera, cada forma, cada geometría elegida tendrá un repertorio de materiales "aliados" para resolverla satisfactoriamente.

Esta conciencia unívoca de forma y material tuvo siempre un referente sabio y evidente: la naturaleza. Hasta hace muy poco tiempo, si se tiene un cuenta el tiempo que el hombre lleva desarrollando su afán constructor, casi todos los materiales de construcción disponibles eran de origen natural, y por tanto su propia procedencia y disposición natural dibujaba o indicaba por si mismo gran parte del abanico estructural.

El árbol y su madera condujo a formas ramificadas, inventó la línea como unidad básica del entramado y permitió las posibilidades de elementos a flexión. Otros materiales, como la piedra, incapaces de trabajar a flexión, mostraron las posibilidades de la superficie y el arco como engendradora de espacios y encontraron en su masividad el aliado constructor.

Material es forma pues de las formas se derivan las tensiones o modos de trabajo que permita un material. EPP, continua: "...la determinación de la retícula interna, o "micro-forma", deberá estar inspirada...en las

trayectorias de tensión que en la forma general, o "macro-forma", produzca el sistema de cargas exteriores...." (fig.14)

Casi podemos identificar en esta sutil reflexión el término "micro-forma" con material, pues retícula interna también es la estructura interna del material y de ella se deriva su capacidad resistente. De nada sirve elegir una forma (macro-forma) que someta al material (micro-forma) a tensiones que éste último es incapaz de asumir.

Existe pues una indisoluble relación forma-material. La escala del problema añadirá a este binomio un grado mayor de complejidad estrechando el abanico de soluciones estructurales.

la desproporción del tamaño

Galileo Galilei, en su libro "Discorsi e Dimostrazioni Matematiche Intorno a Due Nuove Scienze", publicado en 1638, detectó y destacó hábilmente las relaciones que hay entre tamaño y proporción de las piezas. En el se muestra una ilustración de dos huesos de distintos tamaños (fig.15).

Uno de ellos, tres veces más largo que el otro, no mantiene las mismas proporciones en volumen para ser igualmente eficaz. Lo que muestra Galileo se puede entender observando una fruta colgando de un árbol. Si una cereza se hiciera el doble de grande, su peso aumentaría en relación directa al volumen, es decir, crecería con el cubo de su dimensión, mientras que el tallo que la sostiene solo incrementa su resistencia con relación directa a su área, es decir con el cuadrado de su dimensión. Esto hace que una cereza que crezca linalmente acabará en el suelo, pues su tallo será incapaz de soportar un peso que ha crecido más que su capacidad para resistirlo. Con los huesos ocurre lo mismo, basta observar la proporción relativa de la sección de hueso que tienen animales con tamaños muy diferentes.

Esta simple observación limita por si solo el crecimiento de los miembros estructurales. Observando éste fenómeno en los materiales de construcción, podemos deducir (sin considerar otros fenómenos como el pandeo) cual sería la altura máxima de material bajo cuyo peso el propio material llegara al límite de su resistencia. Esto, dependerá de la relación tensión de rotura/densidad de material, lo cual nos muestra una clasificación donde los materiales se ordenarían por eficacia resistente. La madera y el acero resulta ser del orden de seis veces más eficaces en este aspecto que materiales como el ladrillo o el hormigón. Por esta razón, la escala de los problemas estructurales marcará también por si sola el repertorio de materiales disponibles.

FC ha conocido por experiencia propia que el límite razonable de luz para cascarones está en torno a los 30 metros (fig.13). Por encima de esa cifra, la escala, el tamaño del problema modifica sustancialmente



fig 14
EMILIO PEREZ PIÑERO
"la estructura en la forma es lo que hace posible su subsistencia como tal...en el concepto primero, forma y estructura se identifican..." EPP

Forma y material son dos aspectos de un mismo problema, pues de las formas se derivan las tensiones o modos de trabajo que permita un material

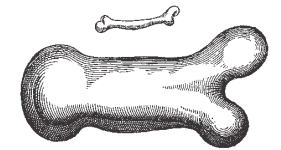


fig 15
Ilustraciones del huesos
Discorsi e Dimostrazioni Matematiche
Intorno a Due Nuove Scienze
Galileo Galilei(1638)

las implicaciones y prioridades de elección. Parece que cada material no solo tiene implícito un abanico formal, sino que determina incluso el tamaño de su propio repertorio.

los tamaños desproporcionados

En el territorio de las grandes luces, sólo triunfan los esfuerzos que resultan más directos, y por tanto más económicos. Estos son tracción y compresión. Trasladar cargas supone un esfuerzo enorme, y minimizar estas trayectorias será el reto estructural. La macro-forma de los puentes de mayor luz no trabajan a flexión, esfuerzo que resulta caro estructuralmente. lo harán a tracción, como el puente colgante Golden Gate en San Francisco (fig.16), sistema con el que se obtienen las luces mayores, o a compresión, como el puente Plougastel en el que la impresionante imagen de la cimbra flotante (fig.17) necesaria para su construcción explica por sí sola las dificultades intrínsecas de las estructuras de grandes luces. Los arcos de estos arcos no serán arcos convencionales. Serán, por inversión, cadenas invertidas, antifuniculares exactos del peso propio. En su espesor y en sus diafragmas contarán con los mecanismos para asumir las otras cargas móviles y alternas como viento, tráfico, etc.

Con esfuerzos directos, se llega a resolver problemas inviables por otros métodos. Como vemos en estos ejemplos, la forma de los problemas se acentúa con la escala de los mismos. Esta es la razón por la cual los puentes de luces cortas pueden resolverse con muchos tipos estructurales diferentes. Los de grandes luces, con problemas "desproporcionados" habrán de recoger los esfuerzos en su tendencia gravitatoria más elemental suspendiéndolos en el aire hasta trasladarlos con premura hasta el suelo.



fig 16
puente GOLDEN GATE, 1932-37
bahía de San Francisco, USA
Joseph Baerman Strauss (1870-1938)
LUZ tramo suspendido=1280m



fig 17
EUGENE FREYSSINET (1879-1962)
cimbra flotante. Luz=188
puente Plougastel, Bretaña, Francia
1922-30

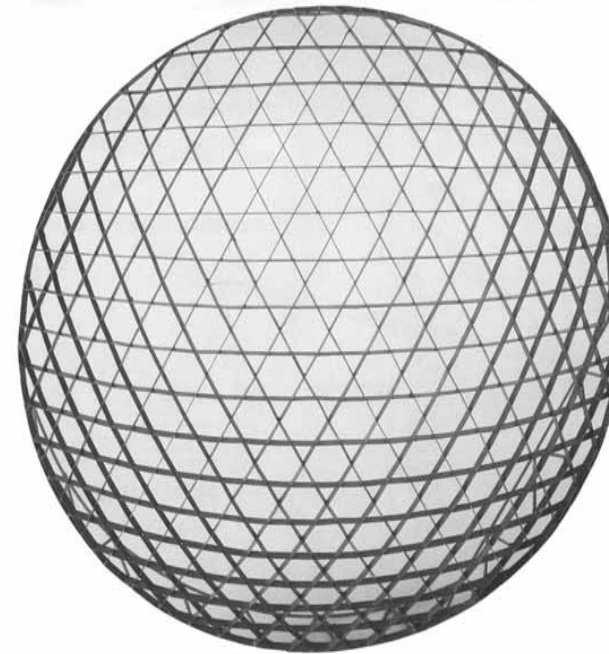
la forma de Anoeta: la curvatura salvadora

"en el caso de las cubiertas de grandes luces, es preciso condicionar todo el proyecto a la forma de la estructura. Dejando al margen las formas colgantes y alabeadas...es la cúpula la forma y solución reina de este problema"EPP

En el concurso de Anoeta, se plantea un problema de gran envergadura. Se trata de cubrir un gran velódromo con una estructura de más de 100 metros de luz. FC y EPP eligen pronto la macro-forma del problema. Su elección es una cúpula, que resuelve el espacio con pulcritud y eficacia estructural, pues es la forma más adecuada para lanzar un material en el aire salvando espacios.

Para la micro-forma de la forma, EPP y FC eligen una estructura reticular como aliado ideal para resolverla con un peso contenido...(fig.18)

"con las cúpulas reticulares se logran espacios internos extraordinariamente limpios y diáfanos; no existen problemas de anclajes ni de empujes; son



formas absolutamente autónomas, y su instalación que no precisa de andamiaje, puede llegar a ser fundamentalmente rápida" EPP

el acero liberador de los empujes

En la larga historia de las cúpulas y de las formas abovedadas en general, el eterno problema fue siempre recoger sus empujes. Estos debían ser soportados por contrafuertes o por el propio terreno y su comprensión y contrarresto fue siempre fuente de problemas, algunos tan conocidos como los de Santa Sofía en Estambul (fig.19). En las cúpulas, este empuje podría recogerse disponiendo un anillo-tirante en su base, con la ventaja de que los empujes queden contenidos en su perímetro. Pero la dimensión de estos esfuerzos está relacionada con la densidad del material empleado para su construcción, y en las antiguas bóvedas de fábrica, gruesas y pesadas, estos esfuerzos eran de tal magnitud que siempre resultaron inútiles las cadenas de hierro o los tirantes de madera que se dispusieron en ellas para recogerlos, como ocurrió en San Pedro de Roma.

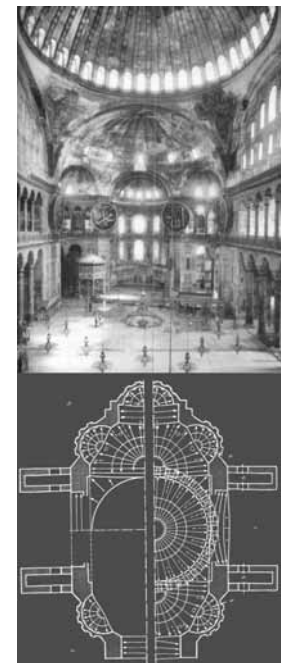
Recoger los empujes de una cúpula para que de este modo sea una estructura autoportante y pueda apoyarse sin más como lo hace una viga, solo ha sido posible desde la aparición del acero como material de construcción generalizado. Ya sólo se trasladan esfuerzos verticales a los apoyos que la soportan y su diseño queda mucho menos condicionado.

fig 18
EMILIO PEREZ PIÑERO-FELIX CANDELA
Concurso para la cubrición del
velódromo de Anoeta, San Sebastián,
España, 1972

maqueta de trabajo con estructura
reticular autoportante.

fig 19
BASILICA DE SANTA SOFIA, ESTAMBUL
532-537 d.C.
vista interior y planta con distribución de
empujes

*En el eje E-W, se organiza un sistema
de semicúpulas, mientras en el eje N-S
los empujes son soportados por enormes
contrafuertes*



Los ejemplos modernos de cúpulas realizadas con hormigón se resolverán siendo fieles a la absorción del empuje mediante contrafuertes contra el terreno, como en el espectacular ejemplo del Palacio de los deportes en Roma, realizado por Pier Luigi Nervi con "dovelas" prefabricadas de hormigón armado y que con sus 100 metros de luz muestra orgullosa el límite alcanzable de forma razonable por este material. (fig.20).



fig 20
PIER LUIGI NERVI (1891 -1979)
palacio de deportes, Roma, 1958-60
LUZ=100metros

Por el contrario, la enorme ligereza comparativa de las cúpulas reticulares de acero permitirá un enorme salto cuantitativo, pues el empuje quedará muy disminuido al bajar considerablemente el peso propio de la estructura.

Para la solución de Anoeta, con un problema de luz similar al ejemplo romano, EPP y FC eligen una estructura reticular de acero de gran ligereza. Pero en la elección de la micro-forma del problema, junto al material, aparece indisoluble otro aspecto capital en la configuración y desarrollo de las formas estructurales. Este no es otro que la propia disposición del material, decidir cómo se ordena en el espacio, en el vehículo de la forma adoptada.

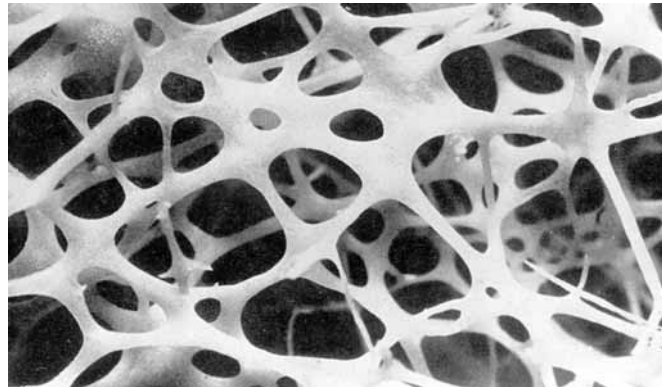
MALLA, MASA Y SUPERFICIE:

2. *Determinación de la retícula, disposición y longitud de las barras. Esto puede llamarse "cálculo geométrico" de la estructura.*

"Si en lugar de trabajar con elementos sólidos pensamos en los huecos llegaremos a la verdad...el arte de la estructura es cómo y dónde colocar los huecos"

Robert Le Ricolais (1894-1977)

Canalizar los esfuerzos de una estructura exige un vehículo, un medio en cual desplazarse. Y este no puede ser otro que la materia. En cada



11

fig 21
fotografía de hueso seccionado y esquema de respuesta a sus solicitaciones principales. La masa ósea en su micro-forma, se revela como una malla orientada de masa, como una materia especializada.



punto de una estructura existirán unas tensiones en equilibrio, y por transmisión y entrega de esas tensiones se canalizarán las fuerzas exteriores a través de la estructura en función de su forma. En último término, es decir, molecularmente, las tensiones en cada punto tendrán unas direcciones y por tanto un resultado vectorial.

Así, la masa se nos descubre ahora como una malla apretada de partículas, de elementos. Como explica el propio EPP

"...la retícula aparece como esqueleto de la forma general, que se supone determinada y fijada previamente. la barra es una condensación de masa en la línea de fuerza y los huecos son una supresión de masa inerte."

En la estructura interna de un hueso seccionado (fig 21) se aprecia como la masa puede especializarse, ahuecarse en direcciones de esfuerzo que atiendan las solicitaciones de la estructura. La superficie es en definitiva una retícula, y por extensión la masa es una malla apretada. Para cumplir su condición de retícula o malla tridimensional, sus partes integrantes han de tener cierta cohesión, ciertos vínculos vitales con sus partículas adyacentes. La malla y la superficie serán lo mismo, y sus posibilidades, enormes. En la bóveda-viga de Torroja para el Frontón Recoletos en Madrid (fig 22) la superficie de la lámina de hormigón es perforada por la luz en una malla triangulada donde las tensiones se acomodan canalizadas por estas "líneas de fuerza". Los trabajadores que construyeron junto a EPP en Calasparra, Murcia, cúpulas reticulares en 1966 para una exposición itinerante, quedan misteriosamente apoyados en la superficie casi inmaterial de sus mallas cupuliformes. (fig 23).

el triangulo rígido

Al ahuecarse la masa, al hacerse el vacío evidente, las partes restantes que canalizan los esfuerzos, podrán deformarse, y para mantener los



12

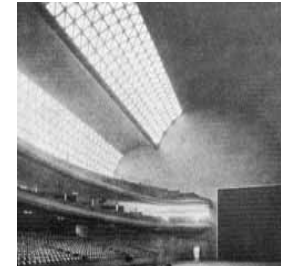


fig 22
EDUARDO TORROJA 1899-1961
Frontón Recoletos, Madrid, 1925

fig 23
EMILIO PEREZ PIÑERO
cupulas reticulares, 1966
en la parte posterior cúpulas macladas para "Festivales de España"

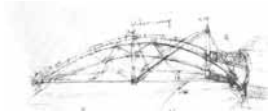


fig 24
LEONARDO DA VINCI
puente giratorio

esfuerzos dentro de ellas, para evitar la aparición de esfuerzos indirectos perversos para sus elementos, será necesaria en toda malla una ley esencial: la triangulación.

El triángulo es la figura indeformable básica. Una malla o una retícula formada por triángulos tendrá una rigidez geométrica inherente, lo que la identifica plenamente con una superficie continua.

Con el principio de triangulación pronto se comprenden las posibilidades estructurales, la ligereza de los elementos así conformados y la rigidez obtenida del conjunto. Ya intuitivas para la madera este tipo de soluciones, como muestra por ejemplo un puente giratorio diseñado por Leonardo da Vinci (fig 24), es con el acero cuando su utilización se extiende a multitud de situaciones y tipos estructurales.

Las posibilidades de la triangulación son enormes, especialmente para aquellos elementos que tienen su trabajo fundamental a flexión. En poco tiempo su comprensión, facilitada por el desarrollo del propio análisis

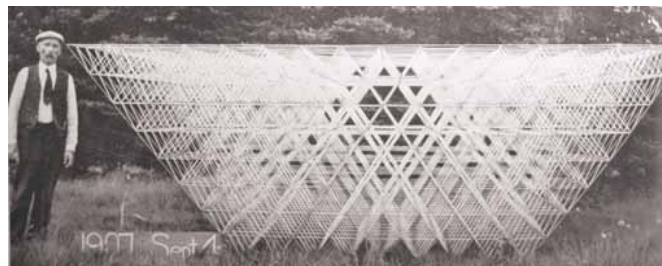
fig 25
BAKER & FOWLER
Forth Bridge, Escocia. 1890
Representación humana del funcionamiento del puente y vista general del primer gran puente construido en acero de la historia.



tensional, proporciona pronto un viaje espectacular, en muy pocos años, desde estructuras ingenuas que muestran dudosas el principio triangulador, hasta estructuras tan maduras como el puente para el ferrocarril de Forth en Escocia.(fig 25), una de las primeras megaestructuras de acero.

El sistema reticular revoluciona y en cierto modo facilita desarrollo del incipiente campo de la aviación, donde sorprendemos a principios del siglo XX. al prolífico inventor del teléfono, Graham Bell, construyendo y volando fabulosas cometas trianguladas que serán el germen de los

figs. 26
GRAHAM BELL (1847-1922)
cometas reticuladas y ensayos para artefactos voladores.



primeros aviones.(fig 26)

El dominio del sistema será espectacular en un corto periodo de tiempo, y llega hasta expresiones tan depuradas de forma-material-malla como las desconocidas torres eléctricas de Suchov en Rusia, uno de los mejores y más desconocidos ingenieros del siglo XX.(fig 27).

EPP y FC participaron también del entusiasmo triangulador y sus ventajas. En el año 1964, FC y EPP proyectan de modo separado y bajo distintas perspectivas estructuras muy similares basadas en el principio reticular. Para EPP el mundo reticular es su propia vida, y a él dedica todos sus esfuerzos. Proyecta con motivo de una Exposición itinerante por España una estructura reticular desplegable plana de extraordinaria eficacia, ingenio y velocidad de montaje.(fig 28).

EPP lleva a la triangulación a su extremo dinámico, y somete al sistema a una personal topología desplegable nunca imaginada antes. Su camino será unir esas líneas de fuerza en articulaciones móviles viajando por el hueco inerte del espacio. Sus mallas despliegan la materia en estructuras estables. Las maquetas que sirvieron para el desarrollo del sistema contienen ya una aportación genial al problema: el nudo de cuatro barras. Con este sencillo nudo, (la sencillez siempre es fuente de lo verdaderamente revolucionario) se obtiene una estructura que plegada resulta extraordinariamente compacta y que una vez desplegada abre un campo de desarrollo y movimiento que EPP llega incluso a adaptar a un helicóptero para su despliegue automático.

FC, por su parte, en el mismo año, desarrolla una propuesta para el Cristal Palace de Londres,(fig 29) donde propone también una triangulación que en este caso aglutina como parte secundaria del cerramiento de cubierta, toda su sabiduría sobre los paraboloides hiperbólicos. Estos participan aquí de un sistema combinado de

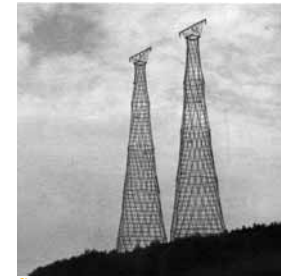


fig 27
VLADIMIR SUCHOV (1853-1939)
Torres eléctricas en Nigrés, Oka, Rusia,
Forth Bridge, Escocia. 1927-29
extraordinaria economía de material y
facilidad de montaje sin grandes
medios auxiliares.

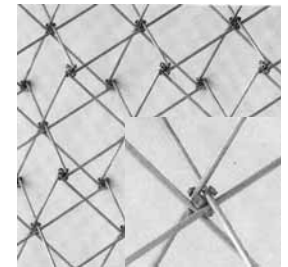
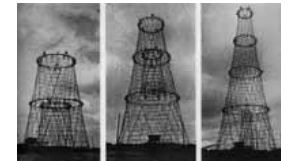
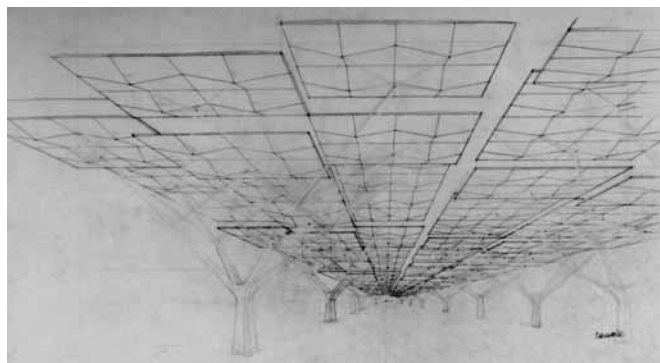


fig 28
EMILIO PEREZ PIÑERO
Exposicion "XXV Años de Paz", 1964

estructura reticular desplegable plana.
maquetas preparatorias y nudo base del
sistema. Conjunto plegado en paquetes
antes de la instalación. Estructura
desplegada con la cubierta unida a los
nudos superiores como rigidizadores.

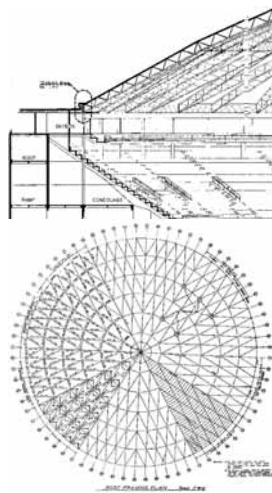
fig 29
FELIX CANDELA
 Propuesta para el Cristal Palace en
 Londres, 1964



triangulación arbórea que inicia para Candela una etapa de preocupación y trasvase desde su mundo laminar al universo de los sistemas reticulares. Las limitaciones de sus cascarones, nuevas oportunidades de trabajos de gran escala, su permanente inquietud vital y el estímulo que suponía para él su relación con EPP influyeron en este deslizamiento progresivo de FC hacia el mundo reticular.

Tal fue su entusiasmo por las posibilidades del sistema, que tras de su solitario camino de cascarones, acepta en 1965 la propuesta de Mr. Cutting para asociar su nombre con él y con la firma Praeger-Kavanagh-Waterbury para proyectar y construir instalaciones deportivas en la Brown University de Providence, Rhode Island. La firma Praeger-Kavanagh-Waterbury es autora ese mismo año de la primera megaestructura de lo Estados Unidos, el Astrodome en Houston, Texas, (fig 30) que resuelve con una cúpula reticular una luz de 212 metros, más del doble que cualquier otra cúpula jamás realizada. FC participaba así desde el principio en las gigantescas necesidades de la

fig 30
PRAEGER, KAVANAGH & WATERBURY
 Astrodome, Houston, Texas.
 LUZ=212 metros
 arquitectos: Lloyd & Morgan+ Wilson,
 Morris, Crane & Anderson.



optimista sociedad norteamericana, y de la investigación para esta universidad, obtiene un sólido conocimiento de las estructuras reticulares, se entusiasma con el sistema y propone una variedad apreciable de soluciones donde siempre encuentra un modo sabio de hacer convivir con los elementos lineales, sus queridas y eficaces superficies de doble curvatura.(fig 31)

la división "ideal" de las cúpulas

La inventiva sobre la "determinación de la retícula, disposición y longitud de las barras" en la definición de las estructuras reticulares, ha sido un problema clásico y ha determinado por sí sola la inteligencia de sus creadores.

La división de la geometría esférica, (fig 32) por ejemplo, ha sido un eterno reto al que se han enfrentado todos los grandes investigadores de estructuras reticulares. La aparente facilidad en la división de la misma tropieza con serias dificultades cuando ésta desea hacerse con la menor cantidad de piezas desiguales. Dividiendo la esfera en meridianos y paralelos obtenemos uno de los primeros modos elementales de división, pero desde el punto de vista de la división tensional no resulta el modo más eficaz: las piezas quedan muy desiguales y la malla no distribuye uniformemente los esfuerzos. Se han investigado multitud de soluciones al problema (fig.33), siempre a la búsqueda de un favorable trabajo tensional y una facilidad de construcción y análisis.

Quizá uno de los métodos más fértiles y conocidos ha sido el patentado por R. Buckminster Fuller (1894-1915), (fig.34) que aunque no fué realmente el inventor de la cúpula geodésica, si popularizó y desarrolló el sistema. Partiendo de una figura inscrita en una esfera, el icosaedro, (fig.35) proyecta sobre ésta última sus triángulos para obtener una división con formas idénticas. Las sucesivas subdivisiones de la misma

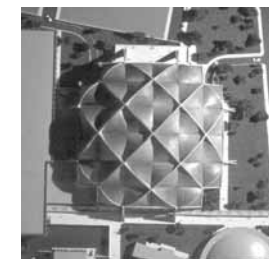
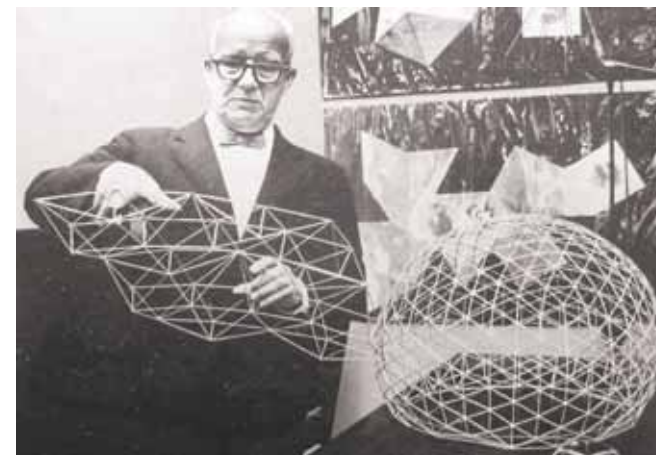


fig 31
PRAEGER, KAVANAGH & WATERBURY
 Astrodome, Houston, Texas.
 LUZ=212 metros
 arquitectos: Lloyd & Morgan+ Wilson,
 Morris, Crane & Anderson.



fig 32
PCAPILLA MEDICI, SAN LORENZO, FLORENCIA.
 esfera poliédrica sobre la linterna, obra de Miguel Angel.

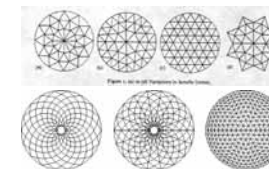


fig 33
 distintas divisiones de la cúpulas

fig 34
R.BUCKMINSTER FULLER (1894-1915)
 gran impulsor de las estructuras reticulares

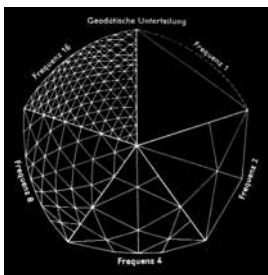


fig 35
R.BUCKMINSTER FULLER (1894-1915)
cúpula geodésica. Partiendo del icosaedro, se obtiene una división por proyección de la esfera en triángulos esféricos equiláteros idénticos. LA subdivisión de estos triángulos ofrecerá igualdad entre familias de barras.

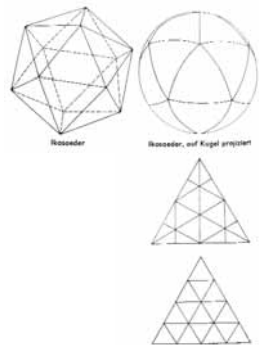
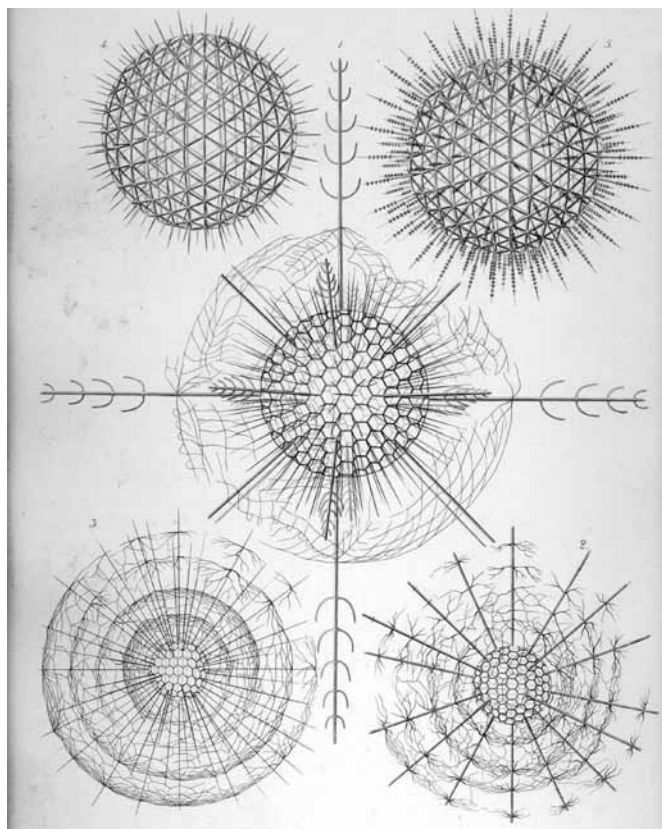


fig 36
ERNST HAECKEL (1834-1919)
láminanº 10 de su libro
"Die radiolarien (Rhizopoda Radiaria).
Eine monographie", 1862
ejemplo de estructuras reticulares
geodésicas en la naturaleza.

darán lugar a las llamadas "frecuencias" que definen la densidad de la malla. La pericia en la subdivisión de la malla mantendrá las barras iguales entre si lo que facilita la industrialización y prefabricación de las mismas.

Ernst Haeckel (1834-1919), Director del Museo de Zoología en Jena, Alemania, publicó en 1862 un libro sobre los radiolarios "Die radiolarien (Rhizopoda Radiaria). Eine monographie", con impresionantes láminas (fig.36) sobre sus fabulosas configuraciones. Los radiolarios, protozoos fósiles con esqueletos adaptados a la flotación, desarrollan fabulosas estructuras geodésicas para medios isotrópos. No es casualidad que en la misma ciudad de su publicación, Jena, y tan solo 50 años más tarde aparece la primera cúpula reticular "radilaria" para el observatorio astronómica Zeiss. Las láminas de Haeckel pudieron mostrar el camino a los ingenieros que buscaban una superficie sobre la que proyectar la esfera celeste. Construyendo un gigantesco radiolario de acero, donde posan suspendidos sus constructores, (fig.37), inauguraron el fértil camino de la cúpulas



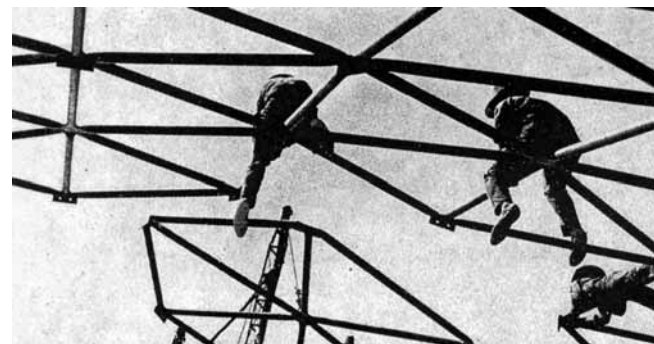
reticulares.

EPP en España desarrollará con sencillez y eficacia, multitud de soluciones con este sistema, mejorando casi siempre el talón de Aquiles del sistema, que es siempre la conexión entre barras y los desajustes a la hora de construirlas. Con ocasión de los itinerantes "Festivales de España" de 1966 (figs.19,38) EPP realizó una estructura con dos cúpulas macladas de considerable tamaño y que fueron montadas y desmontadas en numerosas ocasiones sin errores ni descuadres en su montaje. Con un sistema parecido, acoplando piezas hexagonales rígidas como revestimiento, construyó en 1967 una cúpula de 34 metros de diámetro para proyección cinematográfica por el método Cinerama. Comprende cinco triángulos esféricos enteros, que todavía hoy sigue acogiendo espectáculos.(fig.39)

la triangulación de Anoeta

En el proyecto de Anoeta, la línea y la superficie, dos elementos de una misma geometría, se unifican en un bellissimo ejercicio estructural.

La elección de la retícula o "triangulación" de la superficie, es siempre



motivo de discusión y de difícil equilibrio en su elección.

Como antecedente de Anoeta, FC había encontrado pocos años antes la oportunidad de construir un estructura de gran luz con la invitación de participar en el concurso para el Palacio de los Deportes de la olimpiada de Méjico de 1968. (fig.40)

La cúpula está formada por dos familias transversales de arcos formados por la intersección de la esfera con planos de corte que pasan por el polo de la misma. Esta curiosa decisión parece ser una propia sugerencia de EPP a FC y tiene varias implicaciones estructurales. La primera y más relevante es que permite realizar una cúpula de gran peralte como la proyectada manteniendo los arcos trazados menos inclinados, lo que mantiene en ellos un canto necesario. La segunda

fig 37
DISCHINGER_DICKERHOFF_WIDMAN
Planetario en Jena, Alemania, 1920



fig 38
EMILIO PEREZ PIÑERO
FESTIVALES DE ESPAÑA, 1966
cúpulas reticulares macladas realizadas
con tramos hexagonales.
luz en la base de los casquetes=31m

fig 39
EMILIO PEREZ PIÑERO
Cinerama, 1967
cúpulas geodésica. LUZ=34m





fig 40
FELIX CANDELA
Palacio de los Deportes, Méjico, 1968.
LUZ=140m



fig 41
FELIX CANDELA
Palacio de los Deportes, Méjico, 1968.
LUZ=140m
simbiosis de elementos reticulares de
acero superficies de doble curvatura.

implicación, es que como el propio FC reconocía años más tarde *"en lugar de tener una división radial de la esfera, como es usual, en este caso quedan una especie de paneles cuyo único inconveniente es que no son cuadrados cuadrados...cambian los ángulos y las longitudes de los paneles romboidales resultantes...esto produce una complicación considerable pues todos los nudos son distintos."*

FC siempre recordó esta dificultad de fabricación y ejecución de la endiablada geometría elegida, y en las propias cartas de esos años entre FC y EPP, este tema es recurrente.

En todo caso, es extraordinariamente interesante en este proyecto la simbiosis de elementos reticulares con superficies de doble curvatura, en este caso sus viejo aliado sistema de hypars o paraboloides hiperbólicos que en este caso se realizan también triangulados y que cumplen la misión de cubrición y triangulación de los plementos dejados por la estructura principal. (figs.41)

Esta alianza formal acompañará siempre a FC en sus propuestas de grandes luces, donde encuentra un terreno fértil de expresión arquitectónica. En la propuesta de Anoeta estas ideas se condensan en un último y simbólico prototipo, testimonio inconcluso de una familia de posibilidades que se abrirán en esta convivencia estructural. La solución para la retícula de la cúpula propone una trama casi isótropa, formada por tres familias de arcos formando triangulos equiláteros con espacios de forma hexagonal. (fig.42)

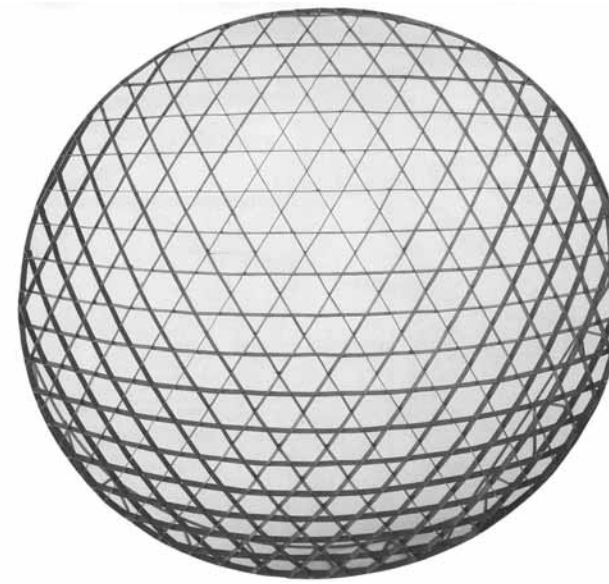


fig 42
EMILIO PEREZ PIÑERO-FELIX CANDELA
Concurso para la cubrición del
velódromo de Anoeta, San Sebastian,
España, 1972

maqueta de trabajo con estructura
reticular autoportante.



Tejiendo una cesta apretada, los arcos se entrecruzan formando una superficie homogénea alternada de triangulos equiláteros y hexágonos. En las maquetas que se han conservado se observa un tanteo para decidir el difícil equilibrio entre peralte, frecuencia de división, y triangulación o micro-forma de la retícula.

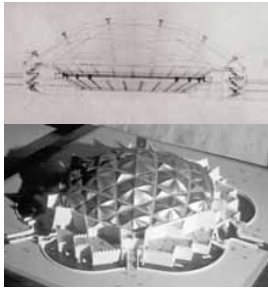
La malla de triángulos y hexágonos había sido ensayada ya por FC cuando en 1968, recibe la invitación del Planning Board de Kuwait para un concurso restringido de instalaciones deportivas destinadas a los Juegos Panarábigos (figs.43,44). Entre los invitados están también Nervi, Tange (asociado con Frei Otto para este concurso), Lloyd-Morgan and Jones (autores del Astrodome de Houston), y otros...FC consulta por carta a EPP sus soluciones y éste le brinda todo su apoyo desde España. En las cartas que se conservan de estas consultas, EPP y FC se refieren en numerosas ocasiones a la división más adecuada de la cúpula, manteniendo siempre un vivo interés por el efecto plástico del conjunto además de su pertinencia o ventaja estructural...

"los planos que te envío corresponden a dos cúpulas cuya directriz es en ambas casquete esférico...la triangulación, que se ajusta a una retícula hexagonal (sin introducir pentágonos), se consigue con círculos máximos. Esto, unido a la gran flecha que tiene el casquete, hace que la variación de dimensiones entre las piezas hexagonales sea notable. Para lograr que las dimensiones de los hexágonos fuera más uniforme, habría que recurrir a disminuir la flecha o hacer una subdivisión a base de círculos menores..." carta de EPP a FC 26.11.1968

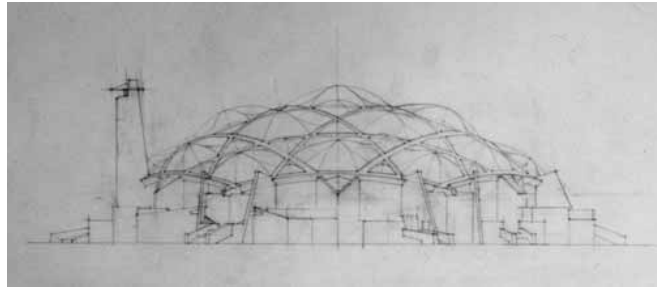
fig 43
FELIX CANDELA
concurso Kuwait



En la solución del concurso se opta por una malla muy amplia de arcos



figs. 44
FELIX CANDELA
concurso Kuwait, 1968-9
planos y maqueta de la propuesta para
el pabellon principal.



de hormigón que de nuevo se "plementa" rigidizada por combinaciones de hypars formando paraguas de doble curvatura.(fig.44)

La decisión de la frecuencia o grado de división de la forma y del peralte de los arcos elegidos, tiene mucha relación con la longitud y la escala de los miembros reticulares resultantes. En su elección, encontramos por tanto decisiones de cálculo que tropiezan en general las macroformas resistentes.

EL CALCULO INNECESARIO

3. Cálculo mecánico y dimensionamiento de las barras.

"una estructura bien proyectada casi no necesita calcularse" F. CANDELA
"lo que necesitamos es una estructura, no un análisis" H. CROSS

En el año 1951, Félix Candela presentaba una Memoria al Congreso Científico Mejicano titulada "hacia una nueva filosofía de las estructuras". El trabajo provocó gran indignación entre los presentes, pero poco después daba la vuelta al mundo en varios idiomas llevándose con él toda una manera de analizar con métodos elásticos las estructuras. Si el hormigón armado no es homogéneo, es decir, no es isótropo, tampoco será en rigor elástico, y por tanto los métodos empleados hasta entonces para su análisis tampoco reflejarían su verdadero comportamiento. FC, anclado siempre a la realidad constructiva, busca enmarcar el problema, acotarlo, mantenerlo dentro de unos márgenes que le permitan acometerlo. FC quería construir cubiertas, no matizar quimeras analíticas. Así, con conceptos analíticos sencillos pero precisamente por ello poderosos, se enfrenta al cálculo de sus construcciones. Él destaca que *"la tragedia de la ciencia es trabajar para un resultado que nunca alcanzará. Tenemos, pues, que conformarnos de antemano con cerrar, aunque sea en pequeñísima medida, el enorme círculo dentro del cual tratamos de aprisionar la realidad"*.

Con esta inteligente y rara distancia, puede uno embarcarse en semejante despliegue de formas resistentes. FC sencillamente construía

sus láminas. En la medida en que sus métodos de cálculo coincidían con la realidad construída, su interés se deslizaba en afinar un espesor, en suprimir una viga de borde, en canalizar de otro modo las fuerzas, en entender al fin las formas resistentes. FC disfrutaba en este enfrentamiento con la gravedad, tratando de aprisionar o cerrar algo más ese gran círculo. Pero conociendo las limitaciones del cálculo, puede decir con elegante distancia que *"Felizmente, las estructuras, más prudentes que el hombre, se empeñan en no caerse y ello nos permite seguir engañándonos con nuestro inocente juego"*.

EPP, respecto al cálculo, lo enfrenta directamente con la realidad:

"el cálculo y dimensionamiento de las barras, salvo en determinadas casos simplificables...es de graves inconvenientes teóricos, haciéndose preciso el ensayo en modelos a escala."

De nuevo aquí la misma distancia entre el análisis y el comportamiento real del objeto. Ensayando a escala la estructura, (corrigiendo como Galileo factores escala-proporción) se deducen de modo directo las leyes que parecen gobernar su comportamiento, del mismo modo que Gaudí imaginaba sus espacios con las cargas que los cubrían (fig.45).

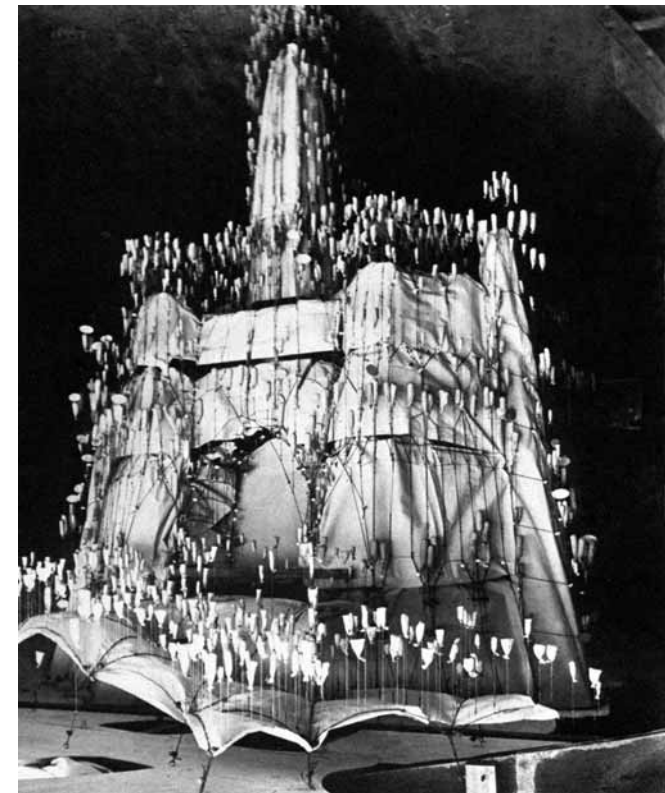


fig 45
ANTONIO GAUDI (1852-1926)
maqueta funicular de la Iglesia de la
Colonia Güell, Santa Coloma de
Cervelló, Barcelona. hacia 1908

imagen invertida de la maqueta.
Los saquitos de arena y las telas forman
al colgar la forma catenaria invertida
del conjunto. Construída de este modo,
toda la estructura trabajaría únicamente
a compresión bajo cargas propias.

En el cálculo mecánico, la propia construcción en su concreta realidad se entrosa con él en un bucle en espiral de mutuos acercamientos al problema estructural.

LA CONSTRUCCIÓN INEVITABLE

4. Resolución constructiva de la conexión de las distintas barras.
5. Formación efectiva de la estructura en su emplazamiento con el montaje de sus elementos.

La resolución constructiva de las estructuras proyectadas es también un campo esencial de creación y puerta obligada para la realización final de lo concebido. Es el punto en el que el proyectista, el inventor, construye mentalmente su creación, la hace por fin suya y la define fijando su íntima configuración. Es, por tanto un aspecto de gran importancia y que como el propio EPP escribe *"por si solo distingue l totalidad de los sistemas existentes, que suelen ser objeto de patentes por sus creadores"*.

FC y EPP hicieron de este tema un problema íntimo. Los dos, en sus distintas circunstancias, hubieron de enfrentarse con la materialización de sus obras. No bastaba con concebirlas, había que construirlas. Y además en ambos casos tuvieron que ser ellos los propios contratistas de sus creaciones. Este aspecto de "autoconstructores" establece con claridad hasta que punto sus mentes estaban sujetas a la realidad. Sus soluciones son directas y depuradas, los problemas expresados hasta la solución más natural, más fácil, más barata, más eficaz, la mejor.

la construcción en movimiento

EPP, ya desde su concurso de Londres, se convierte en fabricante y hecedor de sus artefactos. Construirlos con sus propias manos es para él un mecanismo de pensamiento. Para movilizar la materia en sus fabulosas geometrías desplegadas, la solución detallada del entramado será parte esencial de la genialidad del sistema. La invención es aquí palanca genial en este territorio propio (fig.46).

EPP, poseerá desde el comienzo una pasión desplegada incansable. Su mente reticulará el espacio posible, y lo hará además en movimiento, desarrollando una topología constructiva personal. Su mente portentosa plegará todo con elegancia, facilidad y talento genial. Nadie ha tenido su cabeza dinámica. Sus construcciones móviles son organismos vivos, y así los explica él mismo:

"su forma de trabajo se asemeja al cuerpo de un vertebrado. Las barras a compresión forman un esqueleto, una autentica columna vertebral. Las barras

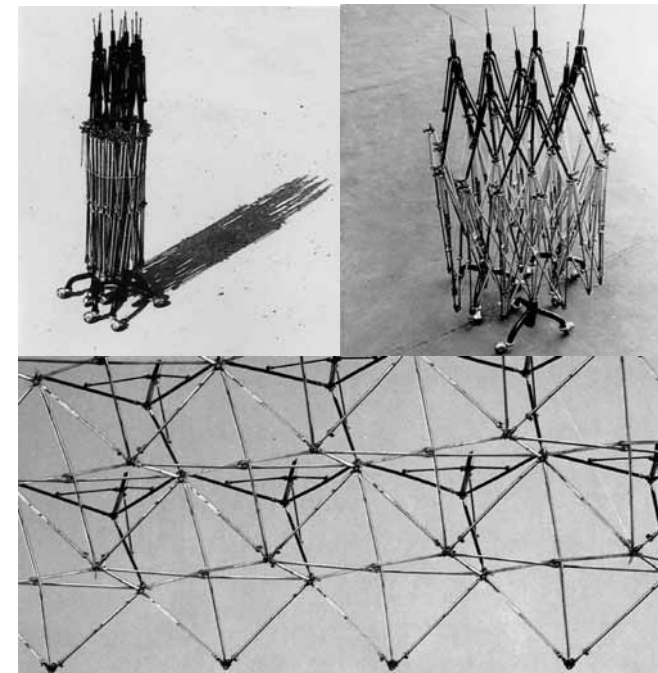


fig 46
EMILIO PEREZ PIÑERO
Estructura autodesplegable
automáticamente desde un helicóptero,
1965

los resortes de barras negras actúan como el sistema muscular que envuelve y mantiene el esqueleto. La estructura se despliega y se rigidiza por estos músculos hasta que se relajan y esta puede volver a plegarse

de rigidización actúan como el sistema muscular que envuelve y mantiene el esqueleto.

Cualquier carga exterior, al tiempo que las hace variar ligeramente de forma adaptándose a la más conveniente posición de trabajo, origina el que determinadas barras a tracción actúen inmediatamente. Ocurre exactamente lo que al cargar el lomo de un gato...Es sencillamente una estructura viva".

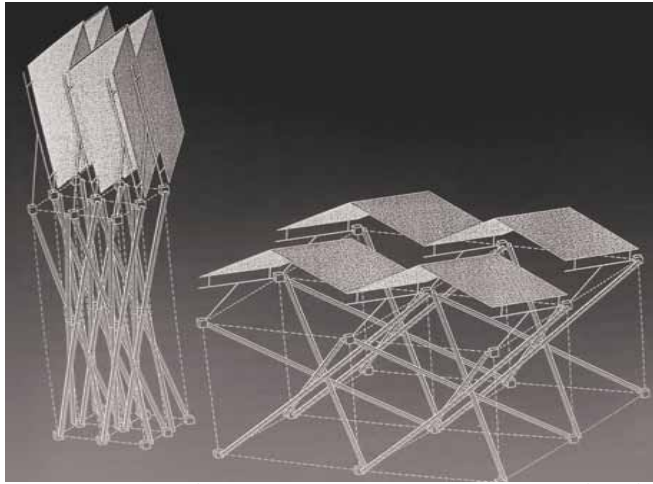
Además la obra EPP posee un carácter casi universal, abstracto, independiente de su aplicación o su circunstancia. La obra de EPP mantiene intacta su potencia precisamente por su enorme grado de abstracción. Aunque aplique sus construcciones a edificios, o satisfaga necesidades materiales de sus clientes, su territorio es casi un álgebra espacial universal. Partiendo de formas básicas consigue con pasmoso talento y genio someter a su esfuerzo plegador cualquier forma básica: una esfera, un cilindro, un plano, toda forma esencial se somete plegada a su topología genial.

Observar su mundo desplegable de formas, asombra tanto como admirar el cosmos y el movimiento de los planetas, y de hecho no es casualidad que EPP, tuviera clientes tan surreales y mágicos como la NASA que se interesó por sus sistemas para cubrir cráteres en la luna.

El surrealismo de sus creaciones alcanzó al propio Dalí para quien construiría sueños tan cuerdos y surreales como plegar un plano en el



fig 47 EMILIO PÉREZ PINERO
Vidriera hipercúbica desplegable.
Presentación en París con Salvador Dalí,
hacia 1972 y esquema básico de
despliegue



espacio (fig.47). Dalí encargó a EPP una estructura que unida a los trozos de una vidriera pudiera empaquetarse y desplegarse. Con un único movimiento, simple y eficaz, EPP concibió el hipercubo, con invenciones constructivas como un brazo que inducido por el propio movimiento de plegado, bascula el paño de vidrio para plegarlo como haría un niño con una hoja de papel.

la hallazgo del hyper

Para FC, desde su primera obra, el método constructivo era parte esencial del problema, y en este aspecto encontró un enriquecedor mecanismo de pensamiento, depuración y superación de sí mismo. FC siempre consideró, como los grandes constructores, que los métodos son las puertas de un sistema verdaderamente capaz, de un sistema que pueda ser adoptado por la sociedad como útil a sus aspiraciones más completas.

En el verano de 1949, construyó su primera cáscara; una bóveda experimental de directriz catenaria (fig.48). Elegida la forma del problema, y dimensionada la estructura, el método constructivo ha influido también en el germen de su concepción. La bóveda, de pequeñas dimensiones, se hizo con pequeños arcos de madera con la directriz catenaria entre los que colgaban modestos sacos de arpillera. El hormigón, al verterse, deformaba los sacos en formas también catenarias, de modo que al fraguar el conjunto se obtenía una estructura de doble curvatura extraordinariamente eficaz por su forma, que resolvía con ingenio y sabiduría los problemas de pandeo que acechan a este tipo de estructuras. Esta experiencia, modesta y fabulosa, humana, real y posible, excitó a FC de tal modo, que encaramado en la clave de su creación (ver figura), consideró muy seriamente entonces dedicarse a fabricar cáscaras de concreto armado.

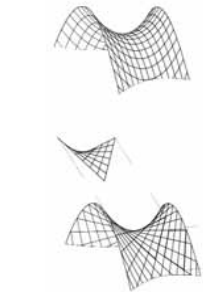


fig 48
PRAEGER, KAVANAGH & WATERBURY
Astródome, Houston, Texas.
LUZ=212 metros
arquitectos: Lloyd & Morgan+ Wilson,
Morris, Crane & Anderson.

Al año siguiente de su primera emoción catenaria, fundaba su empresa Cubiertas Ala, que junto a su slogan "especialistas en arquitectura industrial", tenía que convencer, más allá de la belleza teórica de sus soluciones, de la posibilidad real de ejecutar semejantes estructuras. Enseguida construyó su siguiente cáscara: un conoide que concibió como elemento base de arquitectura industrial. (fig.49) La forma era eficaz estructuralmente y bella en sus posibilidades, pero después de explotarlos formalmente durante cinco años, casi no vuelve a construir ninguno. Su autor no podía conciliar del todo eficacia estructural con método constructivo, ya que la compleja geometría de los encofrados no le dejaban del todo satisfecho en su bondad completa estructural. En su búsqueda de formas eficaces globalmente, FC encontrará en el paraboloides hiperbólico o "hyper" la solución a su búsqueda vital. Una forma fácil de construir, que se deja calcular de modo sencillo y que posee un inagotable repertorio de posibilidades espaciales, según sean los planos de corte que definan este hallazgo formal (fig.50). Al ser una superficie reglada, bastaba trazarlas en los encofrados para obtener las más variadas y espectaculares soluciones formales.



fig 49
FELIX CANDELA
Fernández Factory, 1950
conoide.
esquema formal y imagine Con FC con
trabajadores sobre su cáscara

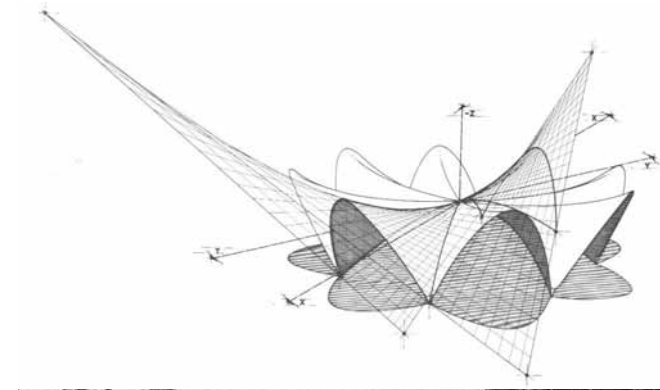


fig 50
FELIX CANDELA
PARABOLOIDE HIPERBOLICO
superficie reglada de doble curvatura
de infinitas posibilidades formales

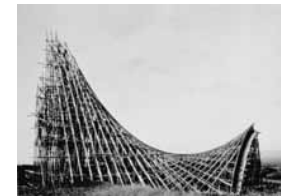
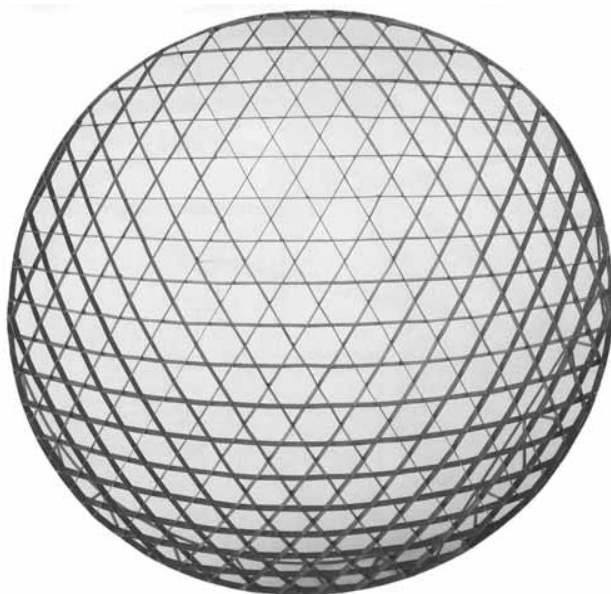


fig 51

EMILIO PEREZ PIÑERO-FELIX CANDELA
Concurso para la cubierta del
velódromo de Anoeta, San Sebastián,
España, 1972

maqueta de trabajo con estructura
reticular autoportante.



LA ESTRUCTURA VELOZ DE ANOETA

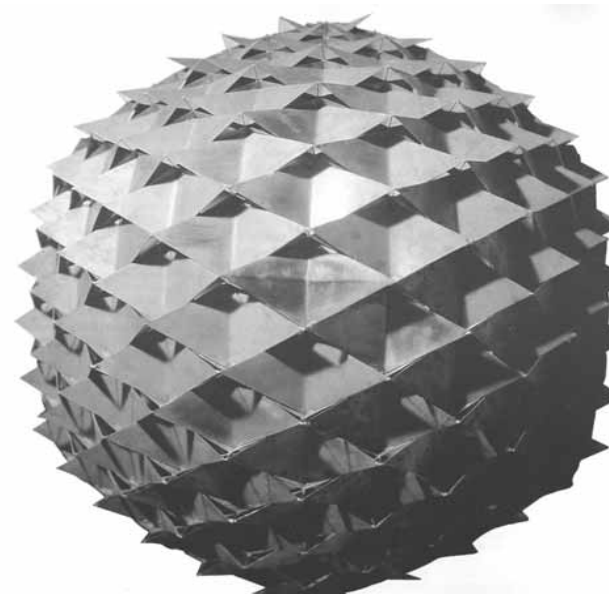
Pertrechados ya con los instrumentos básicos del mundo estructural de ambos autores, podemos descubrir la mágica estructura que plantearon para el velódromo de San Sebastián. La solución constructiva de la propuesta se desconoce, pero esas trayectorias posibles son aquello que más atrae y que importa adivinar...

peralte, malla y frecuencia

En las maquetas de la cubierta que se han podido documentar, (fig.51) las tres familias de arcos formando retículas triangulares y hexagonales parecen ser una decisión temprana y mantenida desde el principio. Sin embargo, una vez obtenida la macroforma y la microforma de la malla, perdura en los dibujos una duda notable sobre su peralte y frecuencia.

Por un lado, las variantes con mayor peralte parecen contener familias de arcos con centro en el polo de la esfera (solución parecida a la "sufrida" en el Palacio de los Deportes). En las variantes de menor peralte esta regla no parece cumplirse, y en ellas se observa, además de una mayor igualdad de trama en su configuración, un canto menor de los arcos en relación a su luz.

Si la cúpula se hace más rebajada, los empujes crecen pero al mismo tiempo puede disminuir el canto de sus arcos, pues las líneas de empuje de las cargas propias se acomodan mejor en un arco rebajado, y



además estos estarán más "precomprimidos" y por tanto capacitados para asumir mayores sobrecargas asimétricas (como viento) sin perder estabilidad. .

La densidad en la trama de arcos (lque se denomina frecuencia) repercute en la cantidad y tamaño de hexágonos a cubrir. En dos de las imágenes de las maquetas de trabajo, se encuentra latente esta duda. Al superponer la imagen que contiene el sistema de cubierta propuesto, y la que tan solo muestra las familias de arcos (fig.52), encontramos una contradicción aparente. Una encaja en otra pero con escala mitad. La frecuencia, que implica número y longitud de barras, aparece como tema imbricado en otros aspectos del problema.

la triangulación: el hypar multiplicado

La decisión de cortar las familias de arcos albergando espacios hexagonales tiene especial interés. En sí, estos espacios no tienen una triangulación eficaz y pueden deformarse. Pero al igual que ocurría en el polideportivo de Méjico DF, esta elección encierra una sabia alternativa a la triangulación, y en ella se descubre el problema enlazado que atrapa y entusiasma a sus creadores: la convivencia de las formas de cubierta en la misión estructural del conjunto.

En la maqueta "cubierta", se propone un conjunto de hypars imbricados en la trama de los arcos que da al conjunto una bella poderosa imagen. Estos viejos conocidos de FC, (fig.53) ceñidos a los perímetros del

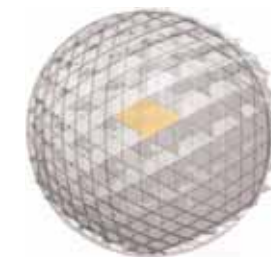


fig 52

EMILIO PEREZ PIÑERO-FELIX CANDELA
Concurso para la cubierta del
velódromo de Anoeta, San Sebastián,
España, 1972

arriba: superposición de maquetas de
trabajo

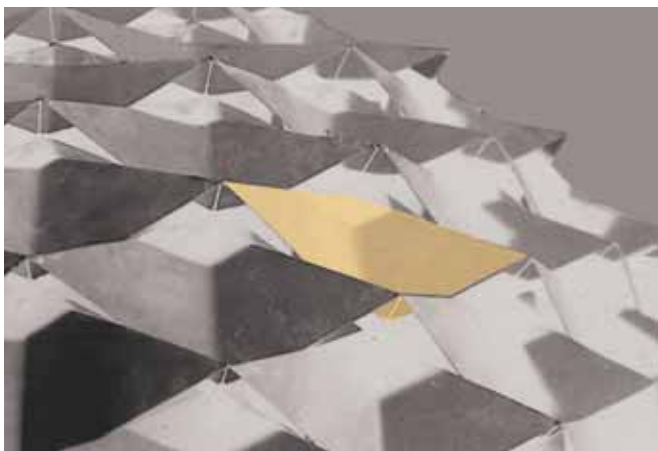
centro: el hypar es incompatible con una
retícula de frecuencia mitad.

abajo: solución compatible de hypar con
la malla de arcos

fig 53

EMILIO PÉREZ PIÑERO-FELIX CANDELA
Concurso para la cubrición del
velódromo de Anoeta, San Sebastián,
España, 1972

HYPARS ligados a la estructura reticular
como elementos estructurales y de
cubrición

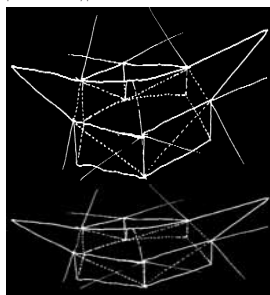


recinto hexagonal arriostran el conjunto actuando como membranas-
lucernario que introducen la luz natural de forma espectacular.

fig 54

INSERCIÓN DE PARABOLOIDE
HIPERBOLICO (HYPAR) EN UN
HEXAGONO

los cantos de los arcos modifican el
peralte del hypar asociado a ellos.



Estos elementos, ligados al hexágono, dependerán en su geometría por
tanto no solo de la frecuencia de la trama, sino también de su peralte.
Si se reduce éste, los hypars quedan más tendidos y el efecto "armadillo"
de las piezas junto a la propia la entrada de luz natural queda más
comprometida.(fig.54)

coladores desplegados

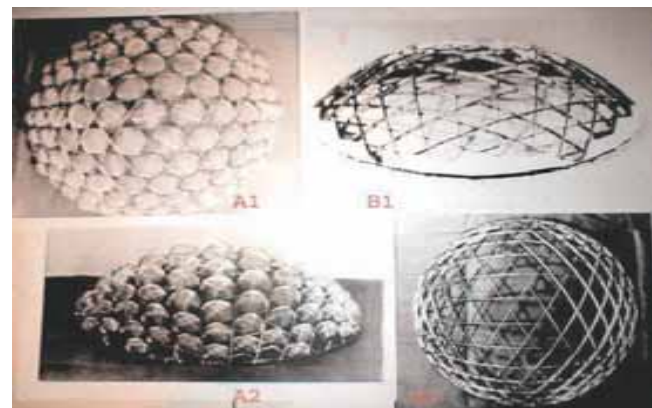
Entre el material que se conserva del concurso, se encuentra una curiosa
alternativa al sistema de hypars para los espacios hexagonales. Se
desconoce la fecha de la propuesta, pero en ella se tantea en cubrir
dichos espacios con cúpulas transparentes a modo de lucernarios. En la
imagen de la maqueta, éstos se realizan con coladores domésticos de
diversos tamaños.

Resulta una incógnita esta variante, pero permite la tentación de
acordarse de la maqueta del Teatro Ambulante y en cúpulas auto
desplegables para su cubrición.

la plegadura universal

Quedan suspendidos en las trazas de esta propuesta caminos
apasionantes que EPP habría podido transitar con soltura. Adiestrado ya
en combinar cerramiento y estructura en un conjunto plegable, como
Candela, trabajará casi toda su vida ahuecando la masa, retirando
material inerte hasta encontrar la superficie-estructura, la superficie capaz
de resolver por su forma, la superficie dispuesta sabiamente en el
espacio que asuma mínima el encargo estructural.

EPP trabajará en líneas desde una misma postura: las líneas canalizan y
condensan los esfuerzos como el esqueleto de la superficie, la retícula
será una superficie especializada, ahuecada, dispuesta con la forma



adecuada a las fuerzas actuantes exteriores. Además Pérez Piñero
asumirá el riesgo del trapecista. Con una pasmosa inteligencia y
sencillez, encontrará en el mundo de las estructuras desplegables su
caldo de cultivo ideal. Su mente reticulada será capaz de desplegar
toda forma imaginable. Eligiendo sabiamente retículas y mallas
adecuadas, plegará planos, cúpulas, semicúpulas, y toda forma
imaginable.

el último salto: un olvido genial

La cúpula de Anoeta escondía todavía un último salto mortal. Después
de la desaparición de EPP, el Ministro de Obras Públicas ofrece a FC la
construcción del concurso de Anoeta como homenaje a EPP. FC trabaja
ilusionado en el desarrollo del proyecto para la empresa Dragados, pero
su propuesta no cabe en el solar con el programa establecido y
finalmente se construye el proyecto ganador del concurso.

Aunque quizá fueron otras razones menos puras las que hicieron fracasar
el proyecto, resulta más tentador pensar que sus autores, enfrascados en
su "armadillo" cupuliforme, trabajando en la abstracción del problema,
olvidaron el solar para construir en uno más grande y capaz, un solar
genial de dimensiones eternas donde recorre veloz para siempre, la
platónica quimera de Anoeta.

Ambos gigantes estimularon como alquimistas los precipitados de la
gravitación estructural, y dibujaron en el aire la estructura veloz de
Anoeta, desde donde ya se divisaban altas cumbres de geometría
universal.



fig 2

EMILIO PÉREZ PIÑERO
TEATRO TRANSPORTABLE, 1961
Primer premio VI congreso UIA,
Londres, 1961

demonstración del propio autor de las
fases sucesivas de apertura de la
estructura desplegable con la cubrición
asociada.

BIBLIOGRAFIA

por orden alfabético de autores

Davies, R.M

Space Structures
New York: John Wiley & Sons, 1967

Dieulafoy, Marcel

L'art antique de la Perse : Achéménides,
Parthes, Sassanides. 5 VOL
Paris, Librairie centrale d'architecture, 1884

R. Buckminster Fuller

México [etc.] : Hermes, 1966

Candela, Félix/Pérez Piñero, Emilio

cartas CANDELA-PÉREZ PIÑERO-CANDELA sobre
cúpulas concursos varios, 1968

Candela, Félix

En defensa del formalismo y otros escritos
Xarait ediciones, 1985

Cardellach, Félix

Filosofía de las estructuras
Librería de Agustín Bosch, Ronda Universidad 5,
Barcelona, 1910

Cedolini, Mario

Strutture. Morfologia strutturale in architettura
Arsenale Editrice srl, Venecia

Choisy, Auguste

Historie de L'architecture, 1899

Paris : Bibliothèque de l'Image, 1996

Escrib, Felix

Las grandes estructuras de los edificios históricos:
desde la antigüedad hasta el gótico
Instituto Universitario de Ciencias de la
Construcción. Escuela Técnica Superior 1997

Faber, Colin

Candela: The Shell Builder
Reinhold Publishing Corporation, NY. 1963

Graefe, Rainer/Pertschi, Tomar

un ingeniere rivoluzionario; Vladimir Grigor'evic
Suchoy 1853-1939
revista CASABELLA 573 pag.38-56 nov.1990

Mainstone, Rowland J

Developments in structural form
Architectural Press, Oxford 1975

Makowski, Z. S.

Studies in space structures : a volume in honour of
Z.S. Makowski
edited by H. Nooshin
London, Multi-Science Publishing Company, 1987

Makowski, Z. S.

Analysis, design and construction of braced barrel
vaults / edited by Z.S. Makowski
London : Elsevier Applied Science, 1985

Makowski, Z. S.

Analysis, design and construction of braced
domes / edited by Z.S. Makowski
London : Granada, 1984

Makowski, Z. S.

Analysis, design and construction of double-layer
grids / edited by Z.S. Makowski
London : Applied Science Publishers, cop. 1981

Makowski, Z. S.

Steel space structures / Z.S. Makowski
London : Michael Joseph, 1965

Michaels, Leonard

Contemporary Structure in Architecture
Reinhold Publishing Corporation, 1950

Mislum, Miron

Geschichte der Baukonstruktion und Bautechnik, 2
Bde., Bd.1, Antike bis Renaissance
Werner, Düsseldorf, 1997

Nervi, Pier Luigi

Costruire correttamente : caratteristiche e
possibilità delle strutture cementizie armate
Ulrico Hoepli, Milano, 1955

Seguí Buenaventura, Miguel y otros

Felix Candela. Arquitecto
Catálogo con motivo de exposición
Madrid, 11 mayo-24 junio 1994
Ministerio de Obras Públicas, Transportes y
Medio Ambiente

W.A.A.

Primer Encuentro Internacional. Estructuras para
grandes luces

Consejería de Cultura. Comunidad de Murcia

Fundación Emilio Pérez Piñero

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de
Sevilla, 1992

W.A.A.

Estructuras desplegables de Emilio Pérez Piñero
Inventores Murcianos

Pabellon de Murcia. 20 abril/12 octubre
Exposicion Universal Sevilla, 1992

W.A.A.

Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas
Fundación COAM, area de cultura
1997

Web

The Historic American Buildings Survey (HABS)
and the Historic American Engineering Record
(HAER)

[http://memory.loc.gov/ammem/hhhtml/hhhom
e.html](http://memory.loc.gov/ammem/hhhtml/hhhom
e.html)

Web

The Alexander Graham Bell Institute (The Bell
Institute) of the University College of Cape Breton
<http://bell.uccb.ns.ca>