

coberturas rígidas adaptáveis na arquitectura

possibilidades de transformação e mobilidade

LUISA BARREIRA ALMEIDA
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ARQUITECTURA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ARQUITECTURA

ORIENTAÇÃO:

PROFESSOR DOUTOR ARQUITECTO JOSÉ PEDRO SOUSA
PROFESSOR DOUTOR ARQUITECTO MAURO COSTA COUCEIRO

nota prévia

A presente dissertação foi redigida tendo como referência o acordo ortográfico anterior ao actualmente vigente. Todas as traduções são feitas de forma livre pelo próprio autor e são, por isso, da sua responsabilidade.

agradecimentos

À minha mãe,

Ao Pedro Barbosa, Nádía Luis e Daniel Vasconcelos,

Aos professores José Pedro Sousa e Mauro Costa Couceiro.

abstract

This essay focuses on the study of covering systems in contemporary architecture within the resolution of collective programs, of sporadic nature. This means that the study focuses on adaptive light covers, considering the change of shape and location. Thus, this type of coverage seems to fit the current socio-economic context - having the economic crisis and the imbalance of the environment as dominant concerns.

The adaptive covers is a type of building in which there is a wide variety of shapes and structural solutions. So, its study is structured according to two adapting methods - mobility and kinetics – and seeks to clarify it, through a classification, its properties. By mobility, it's understandable the possibility of moving the structure, validating the reuse and containment of the material. By kinetics it's understandable the formal change of the structure, quite useful for adapting the same to various circumstances such as weather, versatility functions to the same space, and transportation logistics. The consideration of the kinetics and mobility lead to the need of reducing the weight of these covers, which are intended to be light.

The mobility, kinetics and lightness are characteristics inherent to the field of biology. To this condition, are added the fact that natural systems are efficient structures because they are based on resource savings and their improvement over time. In this way, this work summons biomimetics as a field of interest for thought and design of adaptive rigid covers, discussing authors like Antoni Gaudí, Joseph Paxton, Buckminster Fuller, Frei Otto, Mies Van der Rohe, Santiago Calatrava and Renzo Piano.

To provide a more detailed understanding of the operating method of the adaptable rigid covers, are identified a number of authors that have provided an important contribution to this topic. For this, we propose a division of labor according to a type of systems “Umbrella” and “pantograph”, seeking to expose the limitations and potentialities of each of these building systems. Among these authors, we stand out Buckminster Fuller, Frei Otto, Emilio Pérez Piñero, Félix Escrig and Chuck Hoberman.

At the end of this research it builds up a reflection on the relevance of this theme. Amongst the conclusions, highlights the fact that the kinetic transportable structures facilitate a faster and more flexible deployment, compared to transportable structures systems that do not incorporate mechanisms of movement. Are autonomous covers concerning the structural point of view, in other words, they are self-transportable, and therefore are not subordinated to the physically built. This way allowing extended application domains, oscillating in between its autonomy and as a complement to the built, such as the natural landscape or public space. Note also that the studied type of covers promotes a more current conscious intervention regarding environmental and economic terms, seen by the pointed out adaptable characteristics.

Keywords:

adaptive rigid covers | biomimetics | kinetic systems | Frei Otto | Pérez Piñero | Chuck Hoberman

resumo

Esta dissertação incide no estudo de sistemas de coberturas na arquitectura contemporânea no âmbito da resolução de programas colectivos, de carácter esporádico. Isto significa que se foca o estudo em coberturas leves adaptáveis, que consideram a alteração da forma e do local. Deste modo, este tipo de coberturas parece adequar-se ao contexto sócio-económico actual – com a crise económica e o desequilíbrio do meio ambiente como preocupações dominantes.

As coberturas adaptáveis são um tipo de construção no qual existe uma grande variedade de formas e de soluções estruturais. Assim, o estudo das coberturas estrutura-se segundo dois modos de adaptação – mobilidade e cinética – e procura clarificar, através de uma classificação, as respectivas propriedades. Por mobilidade, compreende-se a possibilidade da estrutura se deslocar, validando a reutilização e a contenção de material. Por cinética, entende-se a alteração formal da estrutura, útil para adaptação da mesma a várias circunstâncias como o clima, a polivalência de funções num mesmo espaço, e a logística de transporte. A consideração da cinética e da mobilidade conduzem à necessidade de redução do peso destas coberturas, que se pretendem leves.

A mobilidade e a cinética e a leveza são características inerentes ao campo da biologia. A esta condição, acrescenta-se o facto de os sistemas naturais serem estruturas eficientes porque se baseiam na economia de recursos e no seu aperfeiçoamento ao longo dos tempos. Nesse sentido, o presente trabalho convoca a biomimética enquanto campo de interesse para o pensamento e o projecto de coberturas rígidas adaptáveis, discutindo autores como Antoni Gaudí, Joseph Paxton, Buckminster Fuller, Frei Otto, Mies Van der Rohe, Santiago Calatrava e Renzo Piano.

Para proporcionar uma compreensão mais detalhada do funcionamento das coberturas rígidas adaptáveis, identificam-se um conjunto de autores que têm prestado um contributo relevante para este tema. Para isso, propõe-se uma divisão dos trabalhos de acordo com sistemas tipo “guarda-chuva” e os sistemas tipo “pantógrafo”, procurando expor-se as limitações e potencialidades de cada um destes sistemas construtivos. Entre estes autores destacam-se Buckminster Fuller, Frei Otto, Emílio Pérez Piñero, Félix Escrig e Chuck Hoberman.

No final desta investigação, constrói-se uma reflexão sobre a pertinência deste tema. Entre as conclusões, destaca-se o facto de as estruturas transportáveis cinéticas facilitarem uma implantação mais rápida e flexível, face aos sistemas de estruturas transportáveis que não incorporam mecanismos de movimento. São coberturas autónomas do ponto de vista estrutural, ou seja, auto-portantes, e por essa razão não se subordinam fisicamente ao edificado. Nesse sentido possibilitam domínios de aplicação alargados, que oscilam entre a sua autonomia e o complemento ao edificado, como por exemplo, na paisagem natural ou no espaço público. Destaca-se ainda que o tipo de coberturas estudadas promove uma intervenção actual mais consciente do ponto de vista ambiental e económico, pelas características de adaptação referidas.

Palavras-chave:

coberturas rígidas adaptáveis | biomimética | sistemas cinéticos | Frei Otto | Pérez Piñero | Chuck Hoberman

0. introdução

0.1 tema	11
0.2 objectivo	13
0.3 organização	14

1. coberturas rígidas adaptáveis

1.1 aspectos de adaptação:	
1.1.1 mobilidade	19
1.1.2 cinética	39
1.1.2.1 estruturas transformáveis simples	45
1.1.2.2 estruturas transformáveis compostas	51

2. influência biomimética

2.1 arquitectura e biologia	61
2.1.1 Gaudí e catenária	65
2.1.2 sistema abobadado de Paxton e a folha “victória régia”	67
2.1.3 geodésicas de Fuller e os micro-organismos “radiolária”	69
2.1.4 coberturas em membrana de Frei Otto e as películas de sabão	74
2.1.5 pilar cruciforme de Mies Van der Rohe e os ossos	78
2.2 a biomimética como busca de sistemas cinéticos	79
2.2.1 sistemas vegetais	81
2.2.2 sistemas animais	83

3. casos de estudo

3.1 sistemas tipo guarda-chuva:	91
3.1.1 Buckminster Fuller	91
3.1.2 Frei Otto	93
3.2 sistemas tipo pantógrafo:	95
3.2.1 Emílio Pérez Piñero	101
3.2.2 Félix Escrig	107
3.2.3 Chuck Hoberman	113

4. considerações finais

115

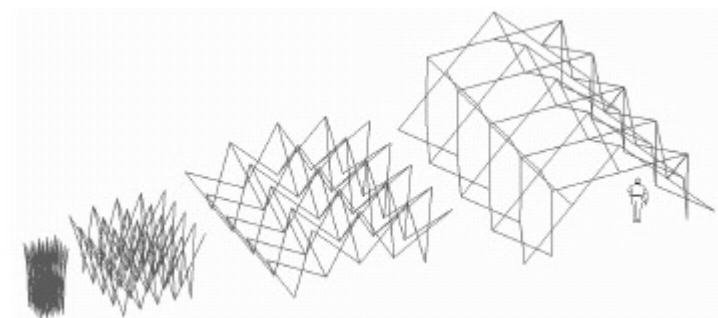
5. bibliografia

121

6. anexos

129

0.introdução



0.1 tema

O tema desta dissertação cruza o campo da arquitectura com o da biologia tendo o propósito de estudar estruturas leves, mais especificamente, coberturas rígidas móveis e transformáveis como hipótese de solução adaptável a várias circunstâncias. São estruturas que conjugam componentes de deslocação – mobilidade – com componentes de variação formal – cinética. São coberturas transformáveis porque passam de um estado recolhido para um expandido pré-configurado. São estruturas que permitem flexibilidade na apropriação do espaço que configuram, maximizando por isso a diversidade de usos.

Justifico a opção por este tipo de soluções face ao campo de intervenção do arquitecto que me interessa estudar: os programas colectivos esporádicos. São programas para ocasiões cívicas geralmente caracterizados por actividades – como eventos festivos, culturais, desportivos – que cumprem uma condição construtiva temporária e contemplam grande concentração de pessoas num espaço. Esta condição requer uma solução preparada para vencer vãos de grandes dimensões que, simultaneamente, proteja e permita a (re)apropriação temporária do solo. Acrescenta-se o facto de serem programas sem local definido que requerem estruturas que os sustentem, muitas vezes itinerantes.

Nesse sentido, interessa-me o estudo de coberturas transportáveis enquanto solução de abrigo porque permitem a deslocação e reutilização, o que significa que uma só estrutura possibilita, a nível operativo, a implementação em diferentes locais. A nível económico e ambiental, a reutilização da mesma é uma característica pertinente considerando o tripé de questões económicas, ambientais e sociais que modelam o contexto actual da sociedade.

Aos requisitos da reutilização e mobilidade acrescenta-se o da variação formal como mais um aspecto da adaptação, que é viável quando a cobertura transportável incorpora no sistema construtivo mecanismos de movimento internos – sistemas cinéticos – que possibilitam a alteração da forma da estrutura global.

As características enunciadas, a nível técnico, diminuem o recurso a equipas de montagem especializada – porque a estrutura é uma peça única que expande e recolhe – e validam a optimização no transporte e no armazenamento – pelo facto da relação do volume que as estruturas ocupam em estado compactado comparativamente à área de extensão que proporcionam quando em estado expandido; a nível operativo garantem maior adaptabilidade ao clima, ao tipo de uso pretendido ou à conjugação de ambos. Acrescenta-se a particularidade de este tipo de coberturas permitir aplicações enquanto complemento ao edificado ou isolado deste, porque são sistemas auto-portantes. Ao conjunto dos critérios referidos que ditaram a selecção dos sistemas abordados ao longo da dissertação acrescento a intersecção com o campo da biologia, mais especificamente o estudo de sistemas cinéticos biológicos como ferramenta de projecto. O contributo da biomimética – mimese de sistemas biológicos – na possibilidade de concepção justifica-se não só pelos aspectos comuns entre coberturas cinéticas transportáveis e sistemas biológicos – ambos são estruturas leves com mecanismos de adaptação – como também pela questão da optimização: os sistemas biológicos contemplam estruturas modeladas em função de recursos mínimos, correspondendo à solução mais eficaz consequente do processo de evolução cronológico multi-milenar. As preocupações actuais com a sustentabilidade do planeta colocam desafios acrescidos no campo da construção, que pode beneficiar de uma aprendizagem de processos similares encontrados na natureza.

Nesse sentido, a investigação proposta conjuga o estudo de coberturas adaptáveis com o estudo de sistemas biológicos numa óptica estrutural, de forma a compreender o interesse das estruturas naturais quando transpostas para artefactos com o propósito de obter coberturas rígidas adaptáveis mais optimizadas. Portanto os objectos de estudo serão os sistemas naturais e artificiais numa óptica construtiva, onde se considera a interpretação dos mecanismos de movimento de ambos os sistemas.

0.2 objectivos

Esta dissertação tem como principais objectivos:

- demonstrar a potencialidade que as estruturas rígidas transformáveis têm quando aplicadas no campo da arquitectura, particularmente enquanto coberturas adaptáveis para programas colectivos esporádicos.

- especificar os domínios de aplicação das estruturas rígidas transformáveis, ou seja, demonstrar a versatilidade que uma só cobertura contém para o(s) uso(s) a que se propõe em locais distintos - nomeadamente para intervenção em programas colectivos nos quais a adaptabilidade é a palavra de ordem - sendo, em simultâneo, uma solução com a vantagem de contemplar a economia de recursos materiais.

- apreender o princípio de funcionamento das estruturas artificiais e naturais, para averiguar em que medida podem os mecanismos que constituem os sistemas biológicos contribuir para a criação de soluções mais eficientes e optimizadas, face às estruturas artificiais correntes. Compreender o que o arquitecto retira das experiências com o mundo natural, especificamente quanto às características de variação geométrica.

A relevância destes objectivos é validada pela reflexão do arquitecto Robert Kronenburg: *“Estruturas que tenham um impacto ambiental baixo e temporário, que utilizem materiais de forma mais eficiente e que consigam responder aos requisitos complexos em locais remotos com adversidades climáticas são particularmente relevantes numa indústria que se está a tornar cada vez mais consciente das suas responsabilidades a nível ambiental. Se estas vantagens podem ser alcançadas com estruturas que usam menos recursos, têm baixo impacto ambiental e são reutilizáveis, é evidente que este tipo de sistemas tem um potencial que deve ser explorado e desenvolvido.”*¹

1. Robert Kronenburg, *Portable Architecture: design and technology*, Basel London: Birkhäuser Springer distributor, 2008, pp.6

0.3 organização

A prova de dissertação organiza-se em duas partes: a primeira – correspondente aos capítulos “introdução”, “coberturas rígidas adaptáveis” e “influência biomimética” – pretende enquadrar o tema; a segunda parte corresponde aos casos de estudo, onde se faz uma abordagem do ponto de vista técnico aos sistemas construtivos seleccionados.

No **capítulo 1. “coberturas rígidas adaptáveis”** faz-se uma categorização geral das coberturas adaptáveis para se compreender a amplitude tipológica que as caracteriza, assim como as possibilidades de aplicação no âmbito da arquitectura. Paralelamente, expõem-se os motivos que justificaram a construção móvel e cinética na prática construtiva ao longo do tempo e o contributo dos respectivos sistemas para desenvolver actualmente o estudo de coberturas cinéticas transportáveis, especificamente para programas colectivos – focando por essa razão o estudo nas soluções desenvolvidas para vencer vãos de grande dimensão, com especial incidência a partir da etapa da industrialização, século XIX.

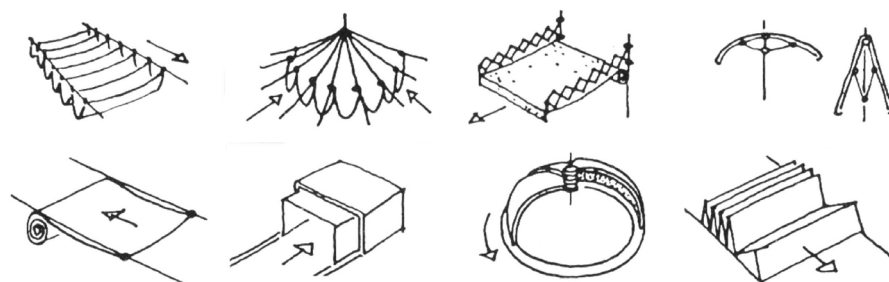
No **capítulo 2. “influência biomimética”** faz-se uma abordagem cronológica à relação arquitectura / biologia por vários motivos: para se compreender que a mimese da natureza – biomimética – é uma estratégia inata para se construir e que as estruturas naturais e construídas pelo ser humano têm princípios de comportamento estrutural comum; para se compreender que as soluções construtivas baseadas em princípios de comportamento naturais correspondem a soluções optimizadas e eficientes do ponto de vista estrutural, e que superaram as limitações tecnológicas da etapa anterior aos métodos de computação. Referem-se sistemas cinéticos biológicos como objectos de inspiração tecnológica para coberturas adaptáveis. Seleccionam-se elementos vegetais e animais, como pétalas de flores e asas, não só pelas diferentes configurações que alcançam enquanto objecto, e particularmente pelo volume que ocupam em estado recolhido comparativamente à área de extensão que proporcionam em estado expandido.

No **capítulo 3. “casos de estudo”** pretende-se um estudo mais detalhado sobre o tema para se compreender as potencialidades e problemas de cada obra. Dentro da categoria dos sistemas cinéticos seleccionou-se as estruturas transformáveis, que correspondem a um grupo mais específico da variação, pelo facto de permitirem a conversão formal. Paralelamente, como complemento aos casos de estudo, o **capítulo 6. “anexos”**, no fim da prova, incluem fichas de obra detalhadas de cada projecto abordado nos casos de estudo, assim como fichas com o processo de montagem das obras.

capítulo 1. coberturas rígidas adaptáveis

“As características de estruturas cuja função é cobrir são inúmeras mas têm em comum o propósito de proteger ou regular das condições climáticas. De grande ou pequena dimensão, estruturalmente simples ou complexas, qualquer cobertura ocupa volume no espaço e cria espaço dentro dela.”¹

No que se refere a coberturas adaptáveis, o arquitecto Félix Escrig estabelece uma divisão entre coberturas “rígidas” e “flexíveis”, com tipologias distintas entre elas. As rígidas correspondem a peças lineares ou superfícies, as flexíveis correspondem a membranas. As imagens seguintes clarificam com exemplos as possibilidades cinéticas para coberturas rígidas e flexíveis. As estruturas em membrana não são objecto de estudo desta investigação.



0. coberturas rígidas e flexíveis com mecanismos de movimento incorporados

1. Paul Oliver, *Encyclopedia of vernacular architecture of the world*, Cambridge Nova Iorque, E.U.A, Cambridge University Press, 1997, pp 347



1. construção suprimida: “Guyaju”, China, séc. VII



2. auto-planificação: construção indígena no México



3. móvel | independente do lugar: caravana



4. cobertura em membrana convertível, Frei Otto



5. auto-construção



6. planificação flexível, “Muna tent city”, Arábia Saudita



7. móvel | independente do lugar: “Transportable Maintenance Enclosure”, FTL, Nova Iorque, E.U.A, 1993

O termo “adaptação” carece de uma definição exacta no âmbito da arquitectura, porque possui conotações distintas segundo as circunstâncias. Nesse sentido importa esclarecer o significado que adquire na actividade construtiva. Segundo o arquitecto Richard Medlin a adaptabilidade “*é o termo geral que inclui a flexibilidade e a variabilidade e pode considerar-se o potencial de uma entidade projectada para se acomodar passivamente ou responder activamente a funções distintas ou condições externas.*”² Segundo Frei Otto “*o termo adaptação deriva de processos do mundo orgânico. Refere a acomodação de um organismo ao seu meio, para conservar ou melhorar condições de vida. Na biologia as estruturas adaptam-se, na arquitectura as estruturas são adaptadas às necessidades humanas.*”³ Na arquitectura a adaptação manifesta-se segundo um espectro alargado de intervenções/temas, motivo pelo qual me parece apropriado o recurso à sistematização proposta por Frei Otto:

ARQUITECTURA ADAPTABLE

ADAPTABLE • MÓVIL • CONSTRUCCIÓN ECONÓMICA • DIVISIBLE • DESMONTABLE
 • AMPLIABLE • AUTOCONSTRUCCIÓN • FLEXIBLE • CAMBIO DE FUNCIÓN • AMPLIO
 ESPACIO • CONSTRUCCIÓN PROVISIONAL • VIDA CORTA • MÓVIL • DE MÚLTIPLE
 USO • CONSTRUCCIÓN SIN COSTES • TRASLADABLE • INDEPENDIENTE DEL LUGAR
 • SISTEMA ABIERTO • ECOCONSTRUCCIÓN • PLANIFICACIÓN FLEXIBLE • PROVI-
 SIONAL • LÍMITES DEL SISTEMA • AUTOPLANIFICACIÓN • TRANSPORTABLE • DIVI-
 SIBLE • FRACCIONABLE • REDUCIBLE • AMPLIABLE • TRASLADABLE • EXPLOTABLE
 • CAMBIABLE • CAPAZ DE SER CAMBIADO • RENTALIZABLE • LIBERTAD DE ELEC-
 CIÓN • AMPLIO • CRECEDERO • CONSTRUCCIÓN SUPRIMIBLE • PLANIFICACIÓN
 DEL TIEMPO

1a. “arquitectura adaptável”,
sistematização proposta pelo
arquitecto Frei Otto.

2. Frei Otto, *Arquitectura adaptable*, Barcelona : Editorial Gustavo Gili, 1979, pp 26

3. Idem, pp 157

No âmbito das coberturas adaptáveis interessa-me abordar os seguintes aspectos da adaptação: a mobilidade – pela possibilidade de deslocação e reutilização – e a cinética – pela possibilidade de variação formal. São aspectos da adaptação que permitem a alteração: do local e da forma. Em termos operacionais, a alteração da forma da cobertura permite a adaptação às condições atmosféricas do meio envolvente – tanto para a optimização de luz num espaço, para protecção à intempérie ou por motivos de climatização. Em termos técnicos a alteração da forma facilita as questões logísticas de transporte, relacionadas com o armazenamento.

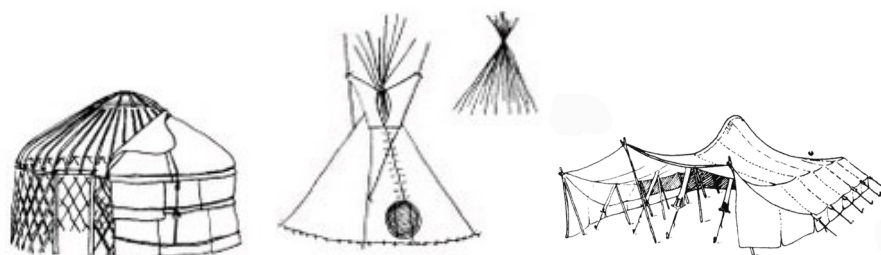
A arquitectura adaptável enquanto construção que considera componentes de deslocação e componentes de variação formal é transversal ao percurso cronológico descrito desde a etapa do nomadismo até à actualidade e manifestou-se da escala do indivíduo à escala do colectivo como resposta às respectivas solicitações práticas, a par das disponibilidades tecnológicas de cada época. Este capítulo inclui soluções de coberturas móveis e cinéticas aplicadas ao longo do tempo e foca o estudo nas soluções desenvolvidas para vencer vãos de grande dimensão, que têm especial incidência a partir da etapa da industrialização – século XIX – pelo desenvolvimento tecnológico que a caracteriza. Paralelamente, explico os motivos que justificaram esse tipo de abordagem na prática construtiva.

1.1 aspectos da adaptação:

1.1.1 mobilidade

As circunstâncias que motivaram a adoção de construções temporárias, são parâmetros a ter em linha de conta a par do progressivo desenvolvimento tecnológico. Interessa, em particular, assimilar a componente técnica relativa à logística de transporte de peças rígidas para estruturas de vãos de grande dimensão, assim como as estratégias aplicadas pelos diferentes autores para combater as adversidades de transporte implícitas neste tipo de estruturas: a logística de transporte de peças rígidas tridimensionais – sistemas treliçados – é uma das maiores adversidades das estruturas transportáveis dessa categoria pelo volume que os elementos ocupam. É uma condicionante que se intensifica quando se trata de sistemas de grandes vãos. *“São geralmente estruturas comprometidas pela dimensão devido às limitações de transporte.”*¹

O recurso a coberturas transportáveis como solução de abrigo para propósitos esporádicos descreve um percurso cronológico milenar com origem na vida nómada da Pré-História e justifica-se ao longo dos tempos por motivos distintos, com o denominador comum na mobilidade e na subsistência. As coberturas incluem as construções dos povos indígenas feitas de vestígios animais e vegetação – como as tendas *teppe*, beduínas e os *yurts* – e tendas enquanto soluções de resposta humanitária a situações de emergência como catástrofes naturais, catástrofes políticas – guerras – ou necessidades militares, com o propósito de uma habitação provisória. *“Encontramos tendas tanto nas campanhas de conquista de Alexandre Magno como na Guerra dos 30 anos, nas quais há acampamentos com os mais diversos tipos de tenda, desde a mais simples até à tenda do Imperador com espaços compartimentados.”*² São exemplos de estruturas concebidas segundo critérios de rapidez de montagem e optimização no transporte. São solicitações práticas que justificam a evolução e amplitude tipológica da construção transportável. São soluções que insinuam o progressivo aumento na dimensão da área de superfície da cobertura, mas que por outro lado se subordinam às limitações tecnológicas.



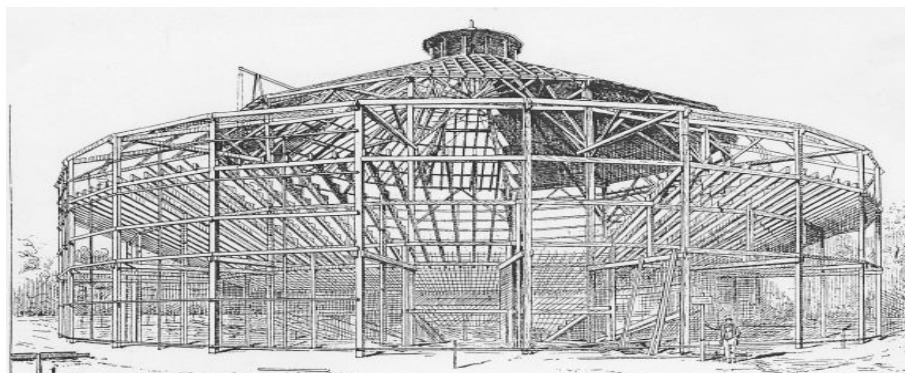
8. exemplos de construções indígenas: yurt, tenda *teppe* e tenda beduína.

1. Robert Kronenburg, *Portable Architecture: design and technology*, Basel Londres: Birkhäuser Springer distribuidor, 2008, pp. 4.

2. Frei Otto, *Arquitectura adaptable*, Barcelona : Editorial Gustavo Gili, 1979, pp. 27

O final do século XIX corresponde à etapa de maior exploração de sistemas de vãos de grande dimensão potenciados pelo desenvolvimento tecnológico nas metrópoles industrializadas, motivo que justificou no século XX a expansão e aplicação de sistemas transportáveis para outros campos além da habitação como o entretenimento, o comércio ou a indústria, a par dos desígnios políticos e culturais emergentes das metrópoles industrializadas que impulsionaram os pavilhões para as Exposições Internacionais como representação da construção transportável. Citando Kronenburg “há vários exemplos na idade Moderna que expressam a capacidade de um espaço responder simultaneamente a critérios de multifuncionalidade e mobilidade, desde o circo a auditórios para concertos, de estações de polícia a hospitais, de escolas a bancos, de fábricas a laboratórios, de piscinas a pistas de gelo, o que significa que a construção transportável não se restringe apenas a soluções de abrigo para ocasiões de catástrofes.”³

O circo constitui um interessante ponto de partida para abordar o âmbito da construção transportável enquanto sistemas de vãos de grande dimensão, impulsionados pelo processo da industrialização. As práticas circenses remontam às civilizações egípcia, grega e romana da etapa da Antiguidade como actividades itinerantes praticadas no espaço público sem o complemento de uma estrutura que as suportasse, mas é no século XVIII, em Inglaterra, com o militar Philip Astley, que se sistematiza a ideia actual do circo enquanto programa colectivo associado a um recinto que suporta as actividades que inclui, sendo inaugurado pelo mesmo o *Royal Amphitheatre of Arts*: uma estrutura constituída por sistemas de andaimes com capacidade de vencer os vãos de grande dimensão solicitados pelo elevado número de concentração de pessoas que o circo inclui. Segundo o arquitecto Christian Dupavillon no livro *Architecture du Cirque*⁴ as estruturas em andaimes foram um sistema estrutural que motivou o respectivo desenvolvimento para as tendas de circo itinerantes, impulsionadas no final do século XIX, como é exemplo o circo *La Saint-Lazare*, 1893.



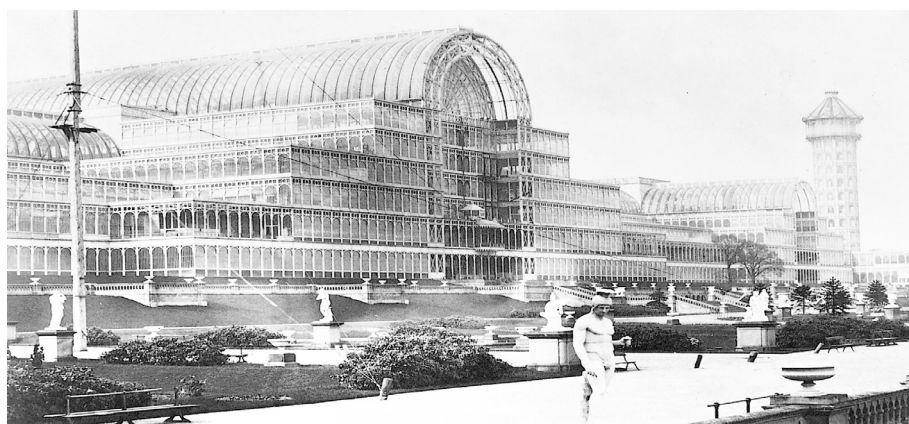
9. circo *La Saint-Lazare*, 1893

3. Robert Kronenburg, *Portable Architecture: design and technology*, Basel Londres: Birkhäuser Springer distributor, 2008, pp. 6

4. Christian Dupavillon, *Architectures du cirque: des origins à nos jours*, Paris: Le Moniteur, 2001

As tendas de circo passam a ser estruturas itinerantes que, por esse motivo, consideram igualmente os critérios de rapidez de montagem e optimização na logística de transporte já contemplados na construção transportável antecedente de pequena dimensão. Segundo Christian Dupavillon são *“técnicas que despertaram o interesse do campo militar, que se preparava para os conflitos da 1ª Guerra Mundial e por isso a urgência de uma solução de abrigo temporário que encerrasse um grande espaço com o mínimo de volume.”*⁵

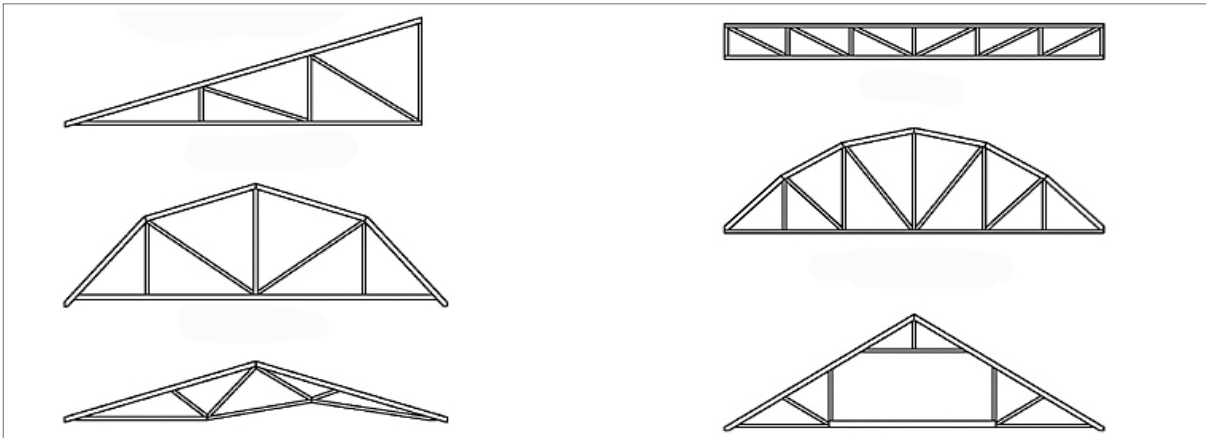
No entanto, o processo da industrialização no contexto europeu marcou não só um momento de charneira a nível tecnológico como também na *“transformação da ordem económica e da vida social, que trouxe inevitavelmente consigo uma correspondente transformação do fenómeno arquitectónico”*⁶ desde a crise dos princípios compositivos do edificado até ao modelo de cidade existente. Isto motivou o desenvolvimento de sistemas construtivos baseados em ideias de flexibilidade e mobilidade aliados a grandes vãos, como resposta mais adequada não só à pressão dominante na concepção de estruturas urbanas como também no espaço habitacional. É nesta condição que surgem os Pavilhões para as Exposições Internacionais como “soluções-tipo” que consideram os critérios e contexto referidos: são soluções que tiram partido do “temporário” para um propósito didáctico, nomeadamente o de testar, sistematizar ou enunciar um sistema estrutural com o objectivo de o adoptar como modelo para a actividade construtiva emergente. Neste sentido os pavilhões são intervenções que expressam a preocupação da vertente crítica e política da cidade, entre os quais destaco o Palácio de Cristal de Joseph Paxton, 1851.



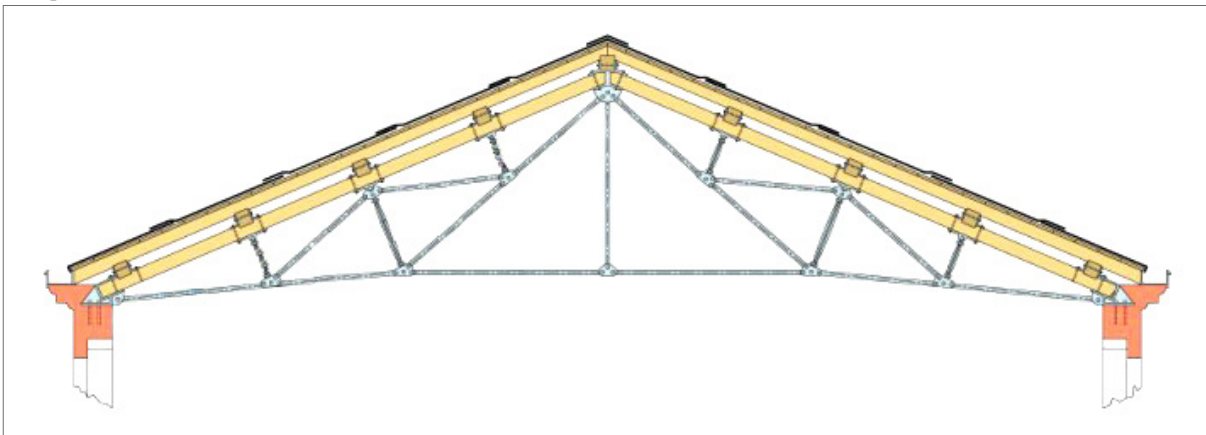
10. Palácio de Cristal, Joseph Paxton, 1851

5. Christian Dupavillon, *Architectures du cirque: des origins à nos jours*, Paris: Le Moniteur, 2001, pp. 29

6. Luis Santiago Baptista, Maio/Junho 2013, Novas Coletividades, a genealogia moderna do colectivo e as novas estratégias comunitárias, *ARQ|a Novas Coletividades*, nº 107, pp. 20



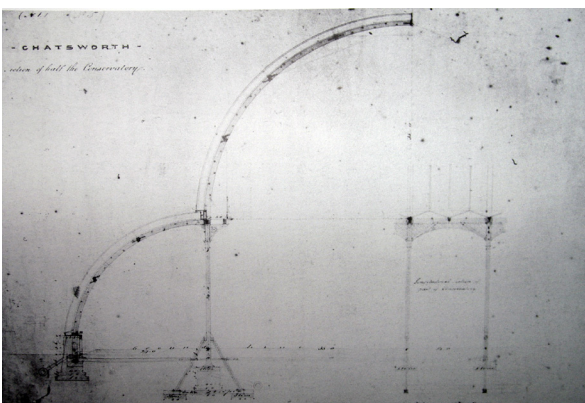
11. tipos de sistemas em treliça



12. sistema Polonceau, 1840



13. cobertura da estação ferroviária wLa Gare St Lazare, 1877



14. pormenor da cobertura do Palácio de Cristal.

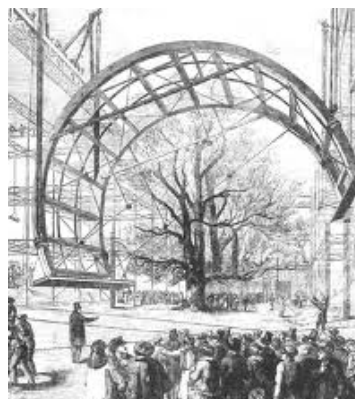
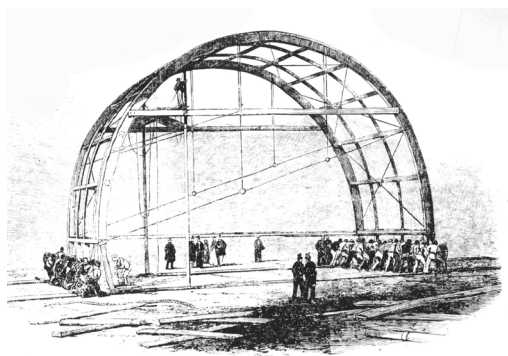


15. interior do Palácio de Cristal

A cobertura do Palácio de Cristal utiliza o sistema construtivo que vincula na sociedade industrial: sistemas treliçados. Por “treliça” designa-se um conjunto de elementos lineares organizados em configurações triangulares: *“um sistema construtivo de triangulações estáveis conjugadas dentro de um triângulo maior que vence o vão. A treliça pode aparecer sob a forma de cobertura inclinada, plana ou abobadada, ou qualquer outro tipo de sistema estrutural constituído por um determinado número de elementos lineares curtos articulados entre si com configuração triangular.”*⁷

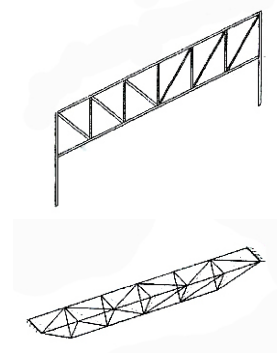
As primeiras treliças em ferro são combinadas com madeira, um sistema estrutural – explorado pelo engenheiro francês Polonceau em 1840 – com grande resistência à flexão, adequado por isso a cobrir espaços com vãos de grande dimensão, nomeadamente estações ferroviárias em Paris, como é exemplo a estação *La Gare St. Lazare*. É o sistema dominante para suporte de coberturas até a proposta alternativa concebida por Paxton enunciada no Palácio de Cristal, que contribui para o desenvolvimento de coberturas abobadadas. Paxton desenvolve a primeira experiência de asna curva em ferro, motivada pela necessidade de construir estufas – e por isso o requisito de uma solução que utilize o mínimo de elementos para garantir a máxima entrada de luz e que evite pontos de ancoragem intermédios. Às necessidades da entrada da luz e vão livre acrescenta-se a de conceber um espaço que encerre o maior volume com a área mínima de superfície, daí o sistema abobadado porque decorrente da forma esférica.

O arco, para além de possibilitar vencer vãos sem apoios intermédios permite construção de vãos de maior dimensão – quando comparado com asnas triangulares ou vigas horizontais – porque é menos susceptível de flectir: tem maior estabilidade e equilibrada distribuição de forças para os apoios. O contributo de Paxton está no desenvolvimento de asnas curvas, no entanto a questão da logística de transporte dessas unidades modulares verifica-se, através das imagens disponíveis, como uma adversidade e um factor não desenvolvido em fase de projecto.

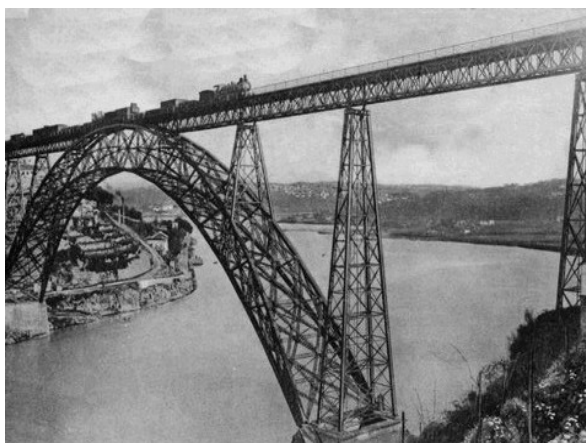


16. Cobertura do Palácio de Cristal, processo de montagem. Desenhos de Patrick Beaver;

7. Hatie Gerd, *Diccionario ilustrado de la arquitectura contemporânea*, Barcelona, G. G. 1982, pp.266



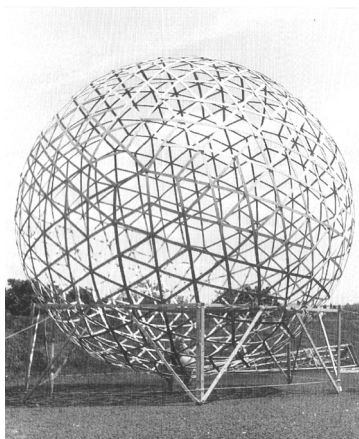
17. treliça bidimensional e tridimensional



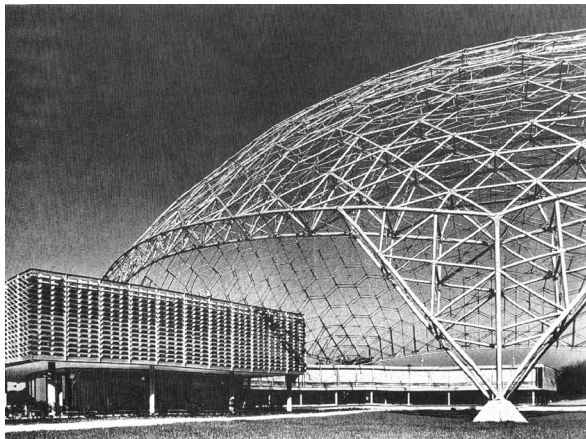
18. ponte D. Maria, Porto, Gustave Eiffel, 1876



19. “Zeiss Optical Works”, Jena, Walter Bauersfeld, 1923



20. “geodome”, Fuller, 1952



21. *American Society for Metals Dome*, Fuller, Ohio, 1959

As treliças tridimensionais para coberturas revelam-se uma estratégia alternativa aos sistemas explorados por Polonceau e Paxton para minimizar a flexão dos elementos à compressão e aumentar a resistência: acrescenta-se à treliça bidimensional um eixo, característica que garante maior estabilidade do sistema.

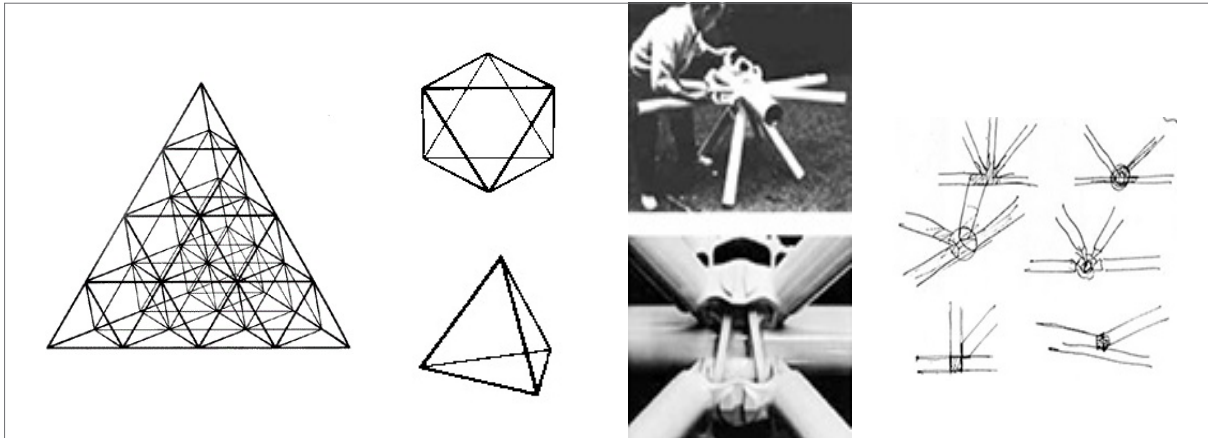
Se o engenheiro Gustave Eiffel, em Paris, 1880, lança as bases da treliça tridimensional enquanto solução de vigas para atravessamento para as pontes que projecta – como a ponte D. Maria no Porto – Walter Bauersfeld, na Alemanha, 1923, introduz o sistema treliçado tridimensional no âmbito das coberturas, com a proposta de uma cúpula para o planetário *Zeis Optical Works* em Jena, estrutura decorrente da necessidade de criar uma superfície curva de grande dimensão para simular o planeta.⁸ No entanto, deve-se a Buckminster Fuller a patente destes sistemas. Fuller explora e otimiza coberturas curvas constituídas por peças rígidas tridimensionais com capacidade de vencer vãos de grande dimensão e a particularidade de atingir a forma esférica na íntegra – como é exemplo a proposta *Geodome*, em 1952, para um planetário⁹ – motivo pelo qual se revelam especial contributo na história da actividade construtiva. Todavia, como são soluções relacionadas com princípios de comportamento naturais este autor será retomado no capítulo referente à biomimética.

As soluções mencionadas são exemplos de propostas que procuram vencer vãos de grande dimensão com o número mínimo de elementos – para diminuir peso próprio da estrutura – e com o mínimo de pontos de ancoragem, sendo constatado que a forma curva – enquanto arco e superfície esférica – e os elementos tridimensionais de base triangular correspondem à solução mais eficiente. No entanto, acrescenta-se outra variável à optimização do projecto: a logística de transporte. A logística de transporte de peças rígidas tridimensionais – sistemas treliçados – é uma das maiores adversidades das estruturas transportáveis dessa categoria pelo volume que os elementos ocupam. É uma condicionante que se intensifica quando se trata de sistemas de grandes vãos. Nesse sentido, Konrad Wachsmann¹⁰ e Fuller são exemplos de autores que contemplam no projecto a preocupação com a logística de transporte.

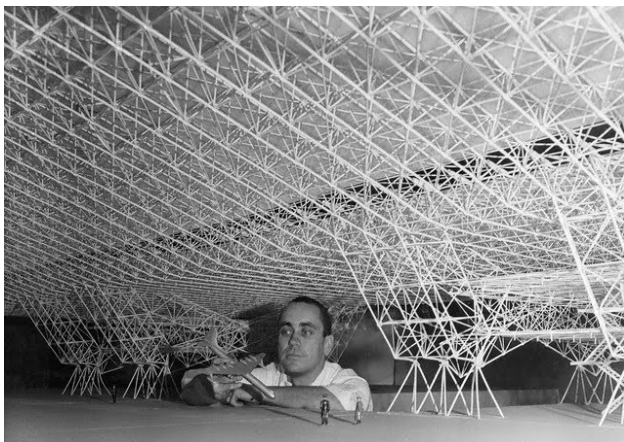
8. “A estrutura é constituída por elementos tubulares em aço dispostos segundo uma malha derivada do icosaedro”, André Cruz, *Arquitectura Biológica: uma análise da obra de Frei Otto*, Coimbra, FCTUC, 2012; pp.37

9. “(...) no interior da esfera era possível observar a lua e as estrelas. Anos antes das primeiras fotografias ao nosso planeta tiradas do espaço, a instalação permitiu uma visão do planeta “visto de fora”, Buckminster Fuller, Martin Pawley, *Buckminster Fuller*, Nova Iorque: Taplinger Pub. Co, 1990. Print. pp. 344

10. Konrad Wachsmann (1901 – 1980), arquitecto alemão que trabalhou com Walter Gropius. Desenvolve o sistema “package house”, uma casa para ser construída em menos de 9 horas;



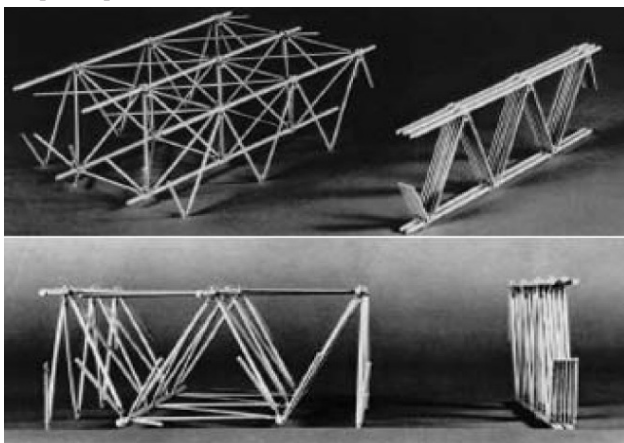
22. sistemas de Konrad Wachsmann



23. protótipo *Us Air Force*, Konrad Wachsmann, 1951



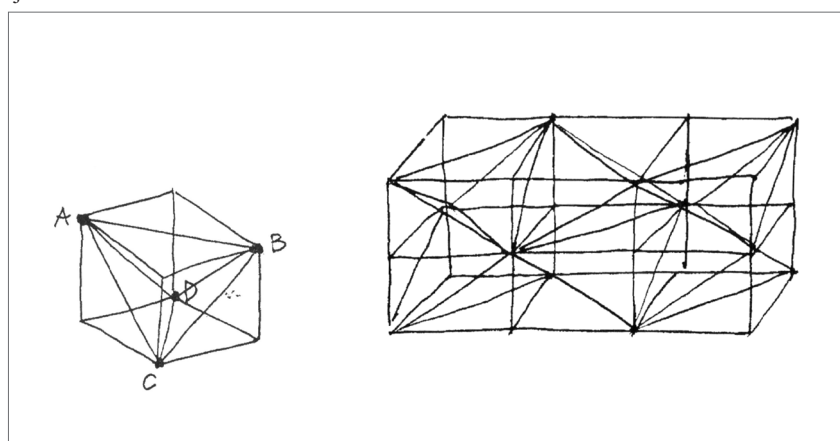
24. *Us Air Force*, detalhe da articulação das peças



25. *Us Air Force*, estudo do sistema de juntas esféricas

26. sistema triédrico proposto por Yona Friedman, 1955.

O sistema triédrico consiste na criação de espaços cúbicos, dentro de uma estrutura tetraédrica, de forma a os espaços vazios poderem ser praticáveis quando utilizados ao nível do piso térreo.



Segundo o arquitecto Arne Petter Eggen, “*Wachsmann contribuiu amplamente para o processo de desenvolvimento de edifícios industriais.*”¹¹ O seu contributo está na proposta de um sistema preparado para articular peças rígidas, particularmente octaedros e tetraedros – que correspondem às unidades modulares dos seus projectos. Octaedros e tetraedros são constituídos por formas triangulares, o que significa que são peças estruturalmente mais estáveis, pelo facto de o triângulo ser uma forma que se “auto-bloqueia”. Esta característica relaciona-se com o facto de a distribuição dos esforços nos segmentos do triângulo estar limitada a dois “movimentos”: tracção e compressão, diminuindo a flexão. Os materiais têm maior resistência a esforços de tracção e compressão, ou seja, a forças axiais, do que a esforços de flexão, ou seja, forças transversais. No que se refere aos sistemas triangulares os octaedros e tetraedros revelam-se formas eficientes, pelo facto de combinarem esforços axiais com transversais: as arestas horizontais não flectem, as diagonais flectem.

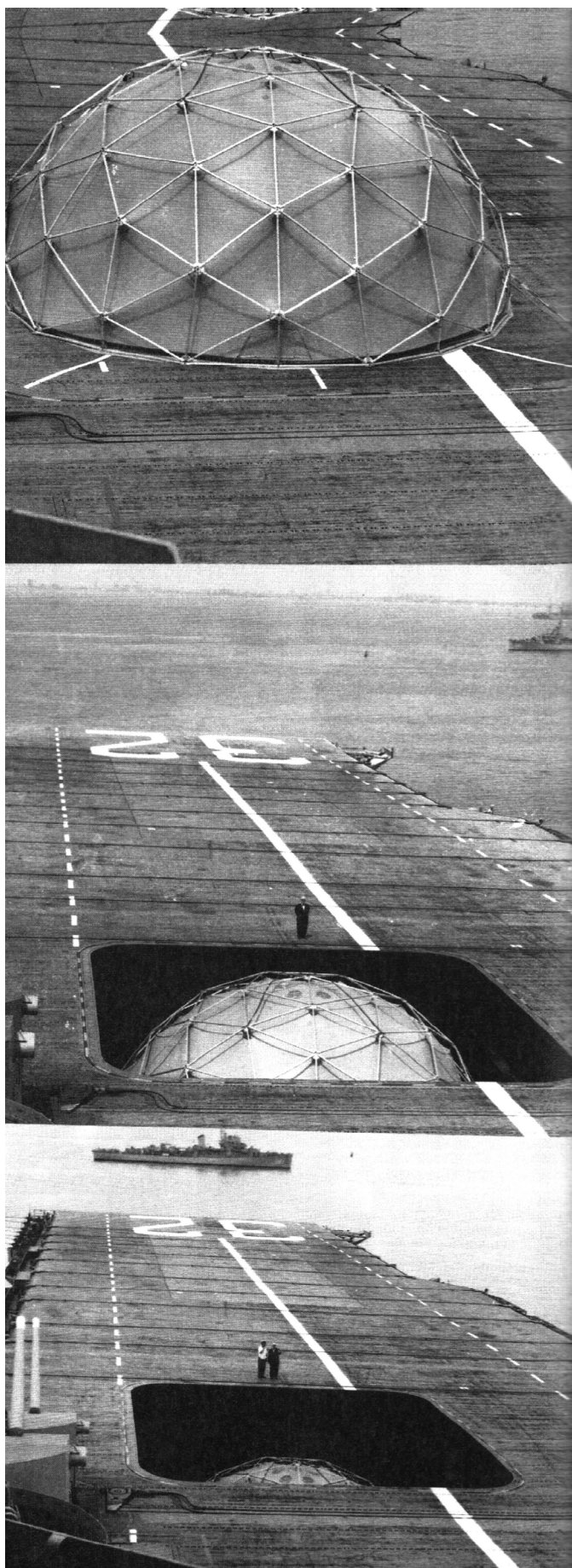
O sistema de juntas esféricas, para além de facilitar o armazenamento das peças – porque podem ser rebatidas – permite combiná-las entre si com ângulos diferentes, como é exemplo o hangar *US Air Force* de 1951. É uma cobertura em consola constituída por unidades modulares que combinam tetraedros com octaedros. A cobertura é articulada para efeitos de armazenamento, mas em estado implementado é estática. No entanto os mecanismos de movimento contribuem para o desenvolvimento de sistemas cinéticos posteriores, particularmente os constituídos por mecanismos “tipo guarda-chuva” e “tipo pantógrafo”, explicados nos casos de estudo. Acrescenta-se o contributo no desenvolvimento de coberturas em consola como outra via construtiva de vencer vãos de grande dimensão: “*a pesquisa realizada no Instituto de Design de Chicago em 1950 para o desenvolvimento deste projecto conduziu-o à sua obra mais significativa, pelo facto de o sistema estrutural tetraédrico que desenvolve permitir vencer vãos de grande dimensão em consola.*”¹²

Para além da necessidade de estudar um sistema construtivo adaptável para efeitos práticos de armazenamento os requisitos de flexibilidade na construção reemergem na década de 50 justificados pelo contexto europeu do pós Segunda Guerra, que apela ao desenvolvimento de “*sistemas de construção urbana em função de um mínimo de material, um máximo aproveitamento do espaço e grande variabilidade.*”¹³ Predomina a instabilidade social e económica mas prevalece a preocupação da vertente política da cidade por parte dos arquitectos, que se complementam pela homogeneidade de objectivos baseada em critérios de reutilização, adaptação e controlo de custos. É neste contexto que destaco o arquitecto Yona Friedman, não só pelas manifestações teóricas –

11. Arne P. Eggen, Bjørn Sandaker, and Mark Cruvellier, *The structural basis of architecture*. Londres, Nova Iorque: Routledge, 2011. pp. 89

12. Idem, pp. 210

13. Frei Otto, *Arquitectura adaptable*, Barcelona : Editorial Gustavo Gili, 1979, pp. 28



27. *Flying Houses* para o corpo da Marinha dos Estados Unidos, 1959

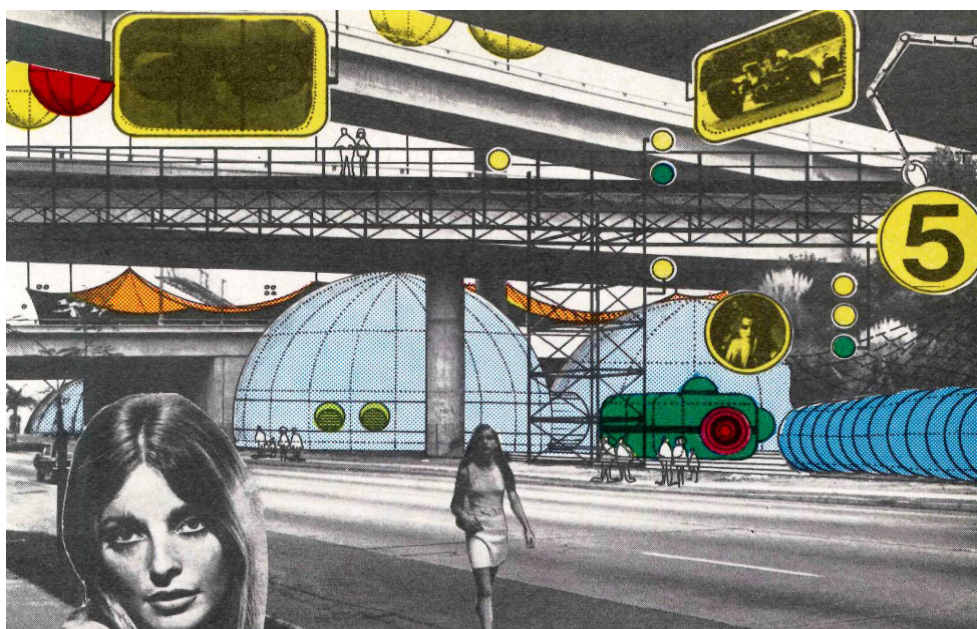
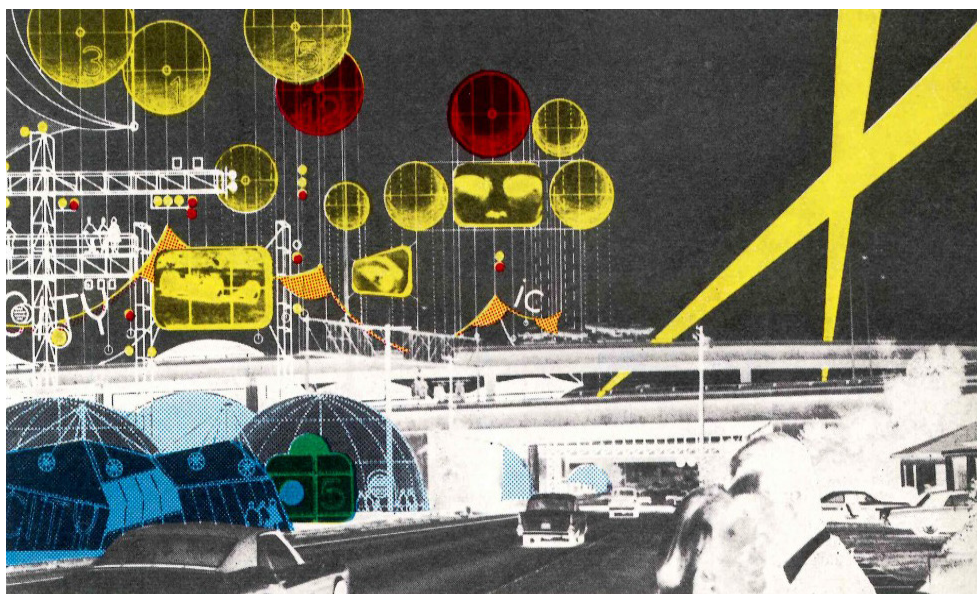
que pretendem promover valores de cidadania e qualidade de vida, no sentido de alterar a condição urbana existente – como também pelas manifestações práticas que tiram partido dos sistemas propostos por Wachsmann. Yona Friedman desenvolve sistemas modulares de peças rígidas pré-fabricadas que permitem várias composições com os mesmos elementos, e com isso a adaptação a vários usos quando aplicadas em intervenções no espaço vivencial. Exemplo ilustrativo é a proposta *Trihedic System*, 1955.

Outro contributo no estudo de soluções que contemplam a logística de transporte será o de Fuller, ao propor o transporte de estruturas via aérea ao considerar a possibilidade de transporte de uma estrutura enquanto peça única. As *Flying Houses* que propõe em 1959 são estruturas rígidas lineares com a forma de semi esferas pensadas como solução de abrigo a helicópteros da Marinha dos Estados Unidos. Fuller recorre ao transporte via aérea enquanto estratégia de deslocação: “o tema de transportar estruturas leves via aérea ocupa o interesse de Fuller pelas possibilidades logísticas que isso representa.”¹⁴

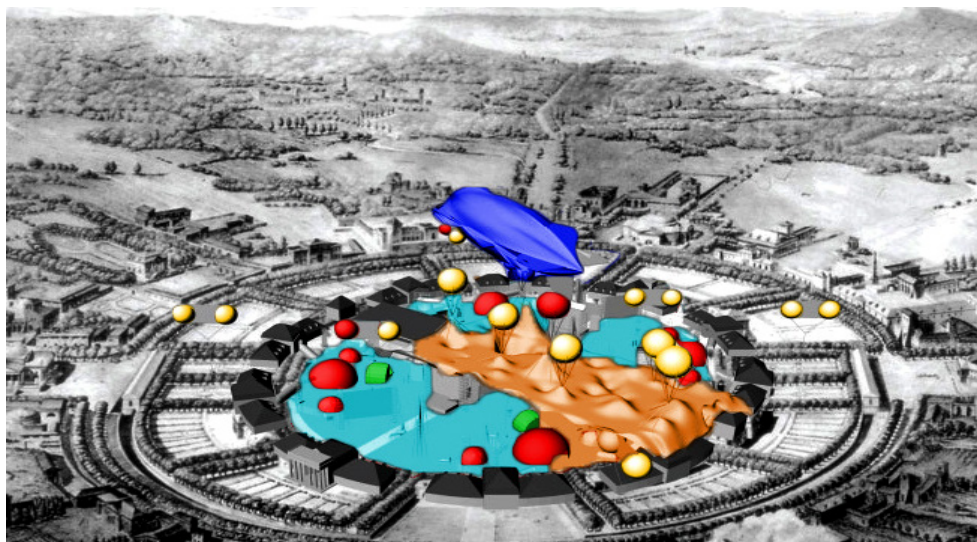


28. transporte da cúpula via aérea

14. Buckminster Fuller, Martin Pawley, *Buckminster Fuller*, Nova Iorque: Taplinger Pub. Co, 1990, pp. 135.



29. propostas para uma cidade itinerante, *Archigram*, 1970



30. *Instant city* interpretada pelo atelier "indayear2studio"; implantação nas Salinas de Chaux, França

Ao longo da segunda metade dos anos 60 começa a ser visível a ocorrência de mudanças, os arquitectos questionam o seu enquadramento na sociedade: *“se durante o pós-guerra a ideia que predomina entre arquitectos e críticos é a consciência da continuidade, no começo dos anos 60 estende-se a ideia da crise dos princípios compositivos da arquitectura do início do século XX, onde as propostas de Archigram na Grã-Bretanha representam alternativas construtivas que superam estes anos difíceis e abrem novos caminhos.”*¹⁵ Contudo, o denominador comum será o do optimismo na tecnologia e a aposta na continuação das práticas assentes em critérios de mobilidade e flexibilidade. A arquitectura como expressão tecnológica define a estratégia de intervenção dos países mais avançados tecnologicamente – como a Alemanha, a Grã-Bretanha – que *“repropõem o espírito pioneiro do desenvolvimento tecnológico do início do século XX.”*¹⁶ Com o propósito de dinamizar o contexto urbano através de *“experimentações de novas estratégias operacionais”*¹⁷, o grupo Archigram abre hipóteses a temas como a *“arquitECTURA enquanto construção desmontável, trocável e produtivo como qualquer outro objecto de consumo.”*¹⁸ Destaco a proposta *Instant City*, 1970, como cidade de tendas que tenciona ser uma comunidade itinerante com o propósito de dinamizar um espaço urbano. Foi implantada em Inglaterra e Los Angeles. *“A cidade chega, é implantada de acordo com as características do local. Nem todos os elementos necessitam de ser utilizados, podendo complementar os edifícios locais ou as ruas. É constituída por vinte veículos com programas distintos operativos na maior parte dos climas e cada um tem um programa que no todo se completa. São várias unidades de tendas de diferentes categorias: umas flutuam através de balões – airships – e são rebocadas para outro destino através de avião; outras são estruturas assentes em camiões e reboques.”*¹⁹

Apesar de, no discurso crítico, as propostas do grupo *Archigram* terem sido consideradas idílicas e desvinculadas das preocupações políticas dominantes, o tipo de sistema transportável proposto pelo grupo revelar-se-á igualmente adequado para intervenções com solicitações técnicas comuns, contempladas nos programas lúdicos da década de 90 – como os concertos de música ou os Jogos Olímpicos. São actividades que requerem como prioridade as questões logísticas – como o tempo de montagem, rapidez de execução e implementação.

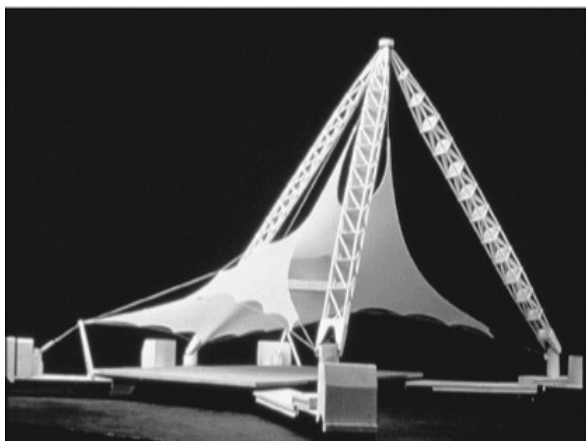
15. Josep Maria Montaner, *Depois do Movimento Moderno, : arquitectura da segunda metade do século XX*, Barcelona: GG, 2001, pp. 110

16. Idem, pp. 111

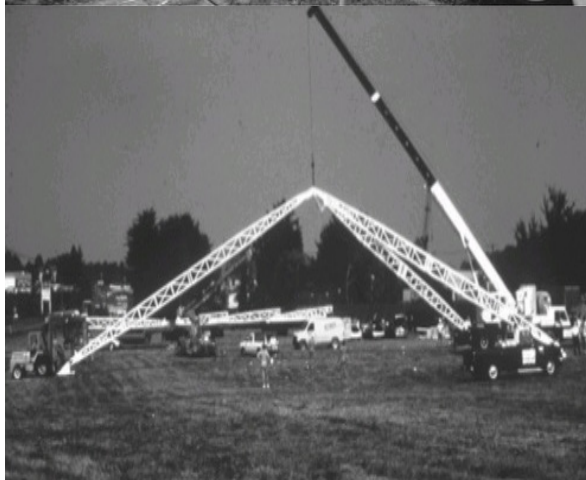
17. Idem, pp. 111

18. Ibidem;

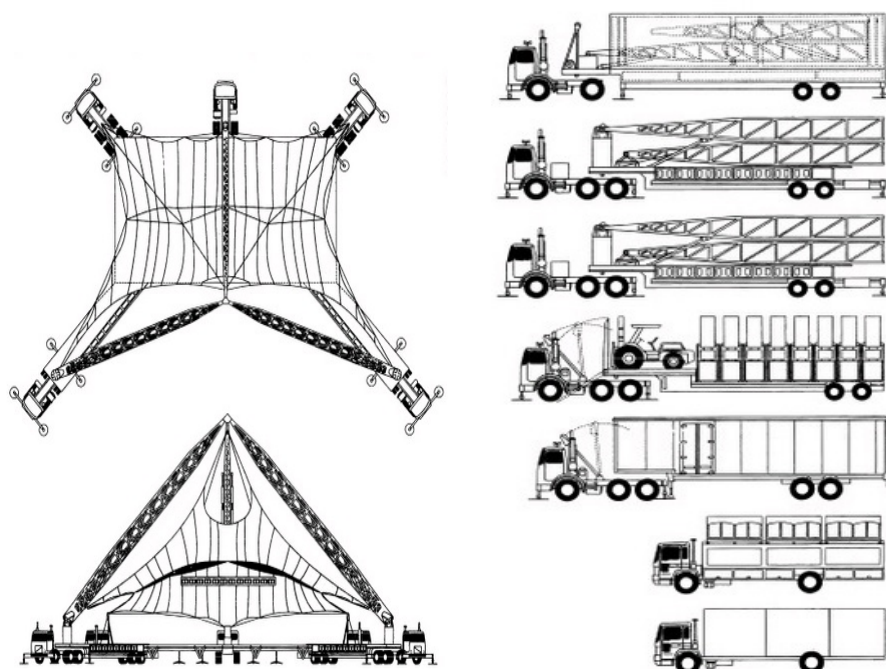
19. Peter Cook, *Archigram*, Nova Iorque: Princeton Architectural Press, 1999, pp. 86



31. “Carlos Moseley Music Pavilion”, maquete



32. “Carlos Moseley Music Pavilion”, processo de montagem



33. *Carlos Moseley Music Pavilion*, planta, corte e logística de transporte

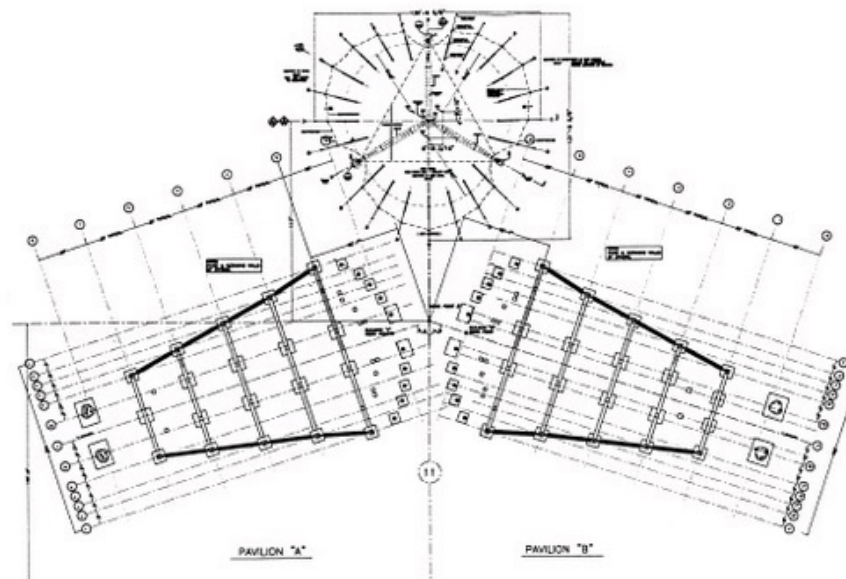
O pavilhão *Carlos Moseley Music Pavilion* para a Orquestra Filarmónica de Nova Iorque em 1991 e os Jogos Olímpicos em Atlanta, 1996 são exemplos da construção contemporânea que materializam uma estratégia de projecto similar à do grupo *Archigram*. São sistemas pré-fabricados preparados para cobrir vãos de grande dimensão, constituídos por coberturas em membrana traccionada. A cobertura do pavilhão *Carlos Moseley* é suportada por um tripé de mastros treliçados apoiados em camiões e cobre cerca de 1000m². A estrutura é transportada em 7 camiões, 5 dos quais com partes integrais da estrutura.

Os Jogos Olímpicos trazem consigo a necessidade de estruturação do território sem se apropriar dele – como rotas pedonais ou infra-estruturas viárias de acesso – e serviços de apoio. São os principais componentes contemplados para a instalação de um grande número de construções temporárias que cumprem igualmente as funções como num aglomerado urbano permanente. No entanto, “a estrutura que é temporária necessita de ser implantada num curto período de tempo e, se o projecto é para ser não só economicamente viável como também ecologicamente consciente, não deve consumir recursos na construção de edifícios permanentes que se irão tornar redundantes quando o evento acabar.”²⁰

20. Robert Kronenburg, *Portable Architecture: design and technology*, Basel Londres: Birkhäuser Springer distributor, 2008, pp. 8



34. *Global Olympic Village*, Atlanta, 1996, processo de montagem



35. *Global Olympic Village*, Atlanta, 1996, planta; dois pavilhões gêmeos e um palco central



36. *Global Olympic Village*, Atlanta, 1996; cobertura de recepção aos Jogos Olímpicos

Um exemplo ilustrativo da estrutura-tipo utilizada no contexto dos Jogos Olímpicos com correspondentes princípios construtivos adoptados pelo grupo *Archigram* é a estrutura de recepção aos Jogos Olímpicos Atlanta em 1996, designada *Global Olympic Village*. É constituída por dois pavilhões gémeos em cobertura de membrana traccionada assente em camiões. Com 27m de largura cada, é um recinto que cobre cerca de 4500m² cuja estratégia de implantação pretende a relação com o espaço urbano. O projecto *Escaravox* proposto em 2012 pelo arquitecto Andrés Jacque insere-se no âmbito da actividade construtiva que pretende reapropriar um espaço urbano no sentido de o dinamizar, funcionando como estrutura de complemento ao antigo Matadouro em Madrid durante o Verão. São duas coberturas baseadas nas estruturas dos sistemas de rega. Para além de servir de cobertura está “*equipada com um sistema de som, uma tela de projecção, um palco e uma cama de água para uso e usufruo dos cidadãos.*”²¹

Os exemplos referidos ao longo do capítulo expressam uma vertente da construção desenvolvida em sintonia com as disponibilidades tecnológicas de cada época. As estruturas móveis pré-fabricadas impulsionadas na etapa da industrialização marcam a tendência para a crescente sistematização da actividade construtiva desta categoria assumindo-se, simultaneamente, como tema de contestação à sacralização da arquitectura. Na década de 90 as propostas para intervenção temporária no âmbito das actividades lúdicas são soluções que actualizam a mobilidade e flexibilidade do nomadismo Pré-Histórico com práticas que reapropriam os princípios das experiências da década de 60. Porém, a componente lúdica que caracteriza uma parte significativa da construção móvel parece sobrepor-se aos desígnios políticos que motivaram a prática construtiva desta categoria impulsionada no século XIX.

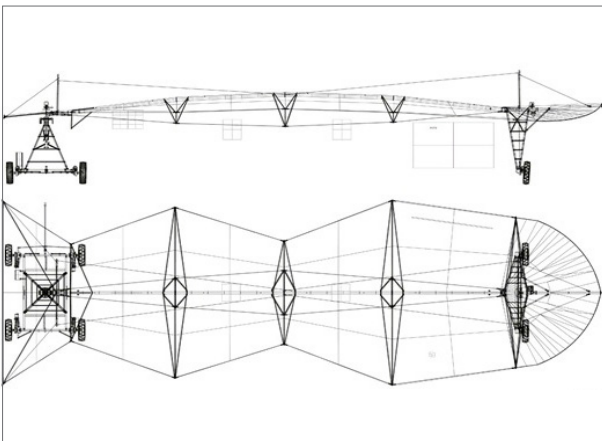
21. <http://www.mataderomadrid.org/convocatorias/1624/escaravox-populi.html>



37. “Escaravox”, Andres Jacque, Madrid, 2012



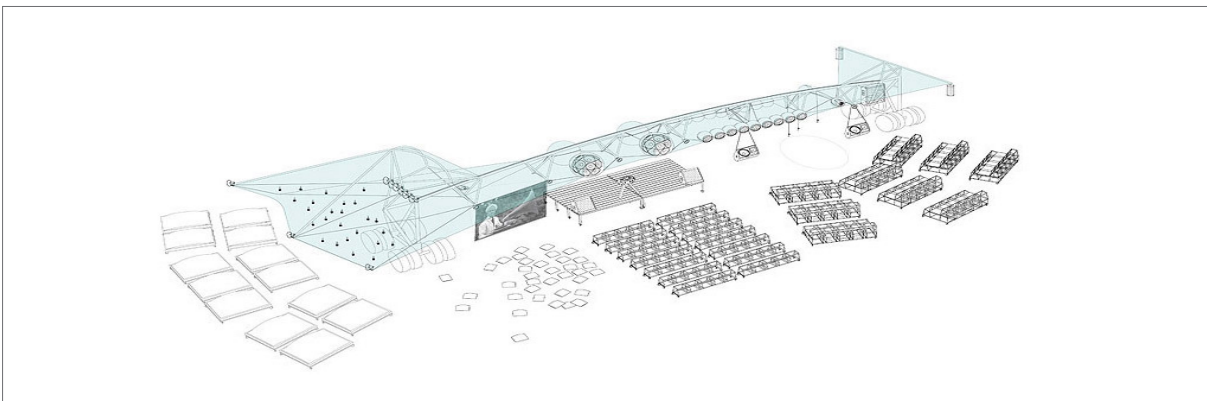
38. *Escaravox*, Andres Jacque, Madrid, 2012



39. *Escaravox*, Andres Jacque, Madrid, 2012, corte e planta



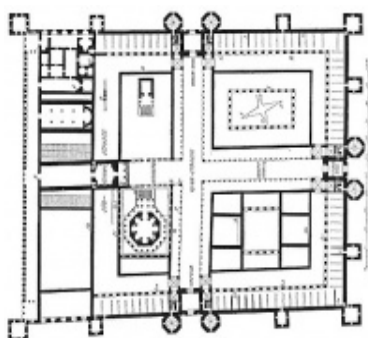
40. “Escaravox”, Andres Jacque, Madrid, 2012, maquete



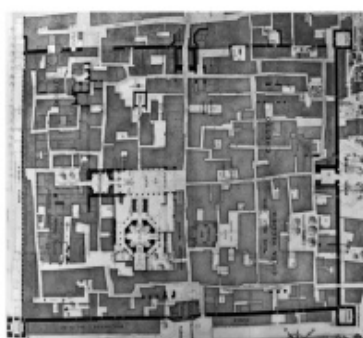
41. *Escaravox*, Andres Jacque, Madrid, 2012, axonometria com possibilidade de disposição do programa

A mobilidade correspondeu a várias etapas do percurso cronológico descrito desde o início da humanidade e assume-se hoje como uma condição que caracteriza a sociedade contemporânea. Como refere o arquitecto Luis Santiago Baptista, *“a questão do temporário ganhou nova relevância nos últimos anos, compreendendo grande diversidade de abordagens projectuais: projectos que respondam a tipologias de natureza performativa – como o teatro; edifícios que procuram materializar a ideia de transitoriedade; intervenções críticas temporárias no espaço público; propostas que permitam a apropriação temporária do território. Propõem-se estratégias activistas e informais, mais leves, rápidas e baratas. São propostas ainda sem programa unificado nem método definido.”*²²

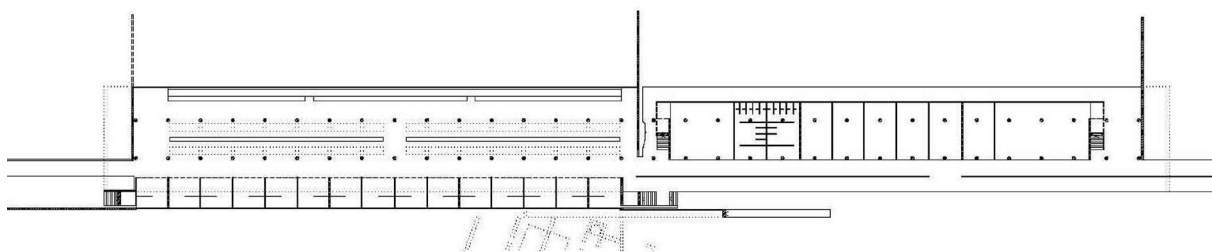
22. Luis Santiago Baptista, Maio/Junho 2013, Novas Coletividades, a genealogia moderna do colectivo e as novas estratégias comunitárias, *ARQ|a Novas Coletividades*, nº 107, pp. 20



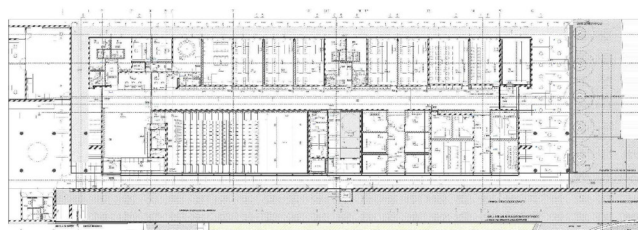
42. Palácio Spalato



43. Palácio Spalato transformado em cidade



44. Mercado de Braga, Eduardo Souto Moura

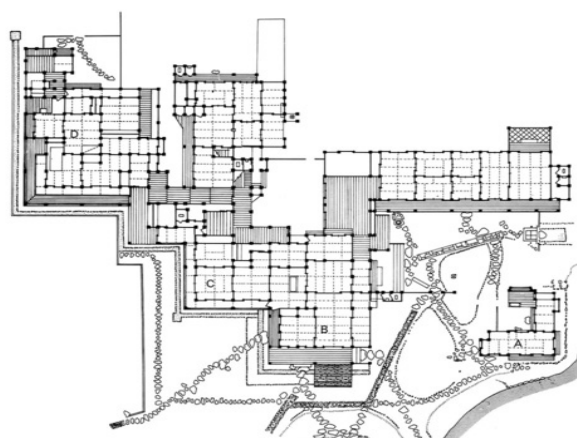


45. Reconversão do Mercado de Braga em escola de música, Eduardo Souto Moura

1.1 aspectos da adaptação:

1.1.2 cinética

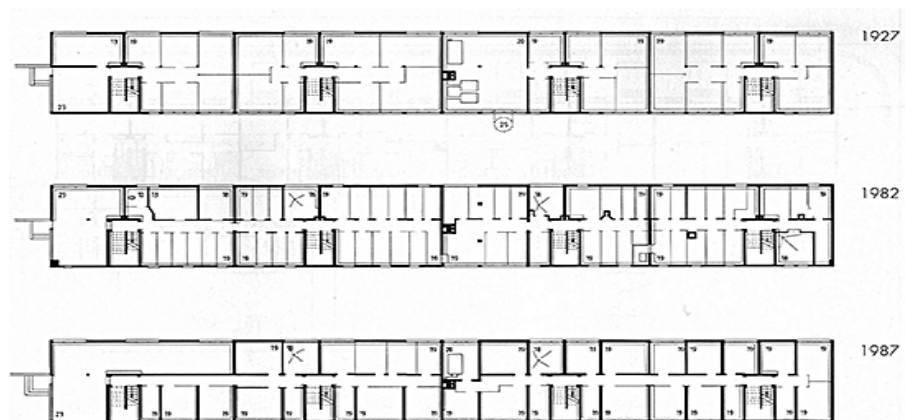
A cinética enquanto hipótese de adaptação introduz na arquitectura, que é estática, a questão da dinâmica associada à impermanência, que se justifica pelo facto de a condição de mudança ser inerente ao próprio indivíduo. A transformação dos padrões de vida sociais e económicos traz inevitavelmente consigo uma correspondente transformação no âmbito construtivo. Os espaços de maior êxito são os que prosperam em circunstâncias de mudança, como são exemplo o Palácio de Spallato e o Mercado de Braga, ambos submetidos a alteração do propósito destinado. O Palácio de Spallato do século IV como testemunho da Antiguidade Clássica e o Mercado de Braga do século XX como referência da arquitectura Contemporânea, são duas obras que balizam duas etapas cronologicamente distantes da História da arquitectura mas que se aproximam e ilustram bem o que pretendo evidenciar da actividade construtiva dominante enquadrada nesse percurso cronológico secular: ambas são exemplos de edifícios caracterizados por um sistema estrutural fixo e pensados para uma localização específica como, aliás, quase toda a História da arquitectura. O que pretendo evidenciar destes exemplos é que, mesmo pensados para a permanência, a mutabilidade inerente à condição humana conduziu à apropriação e adaptação do espaço para utilização diferente da inicial: o Palácio Spallato foi transformado em cidade, o Mercado de Braga reconvertido em escola de música. Contudo, o estado de impermanência não se reflecte apenas na apropriação ou manipulação da matéria física mas também na sua deterioração, motivo pelo qual o registo dominante da História da arquitectura se baseou no testemunho das ruínas de pedra, porque mais resistentes do que outros materiais como madeira ou tecidos, aspecto que não invalida a existência em paralelo de construções nesses materiais. Estes exemplos reforçam a ideia que nada é estático e imutável, mesmo quando pensado para a permanência.



46. palácio Katsura, Japão,



47. casa Schroder de Gerrit Rietveld, 1924



48. bloco para habitação colectiva, Mies Van der Rohe, Weissenhof Siedlung, Stuttgart, 1927

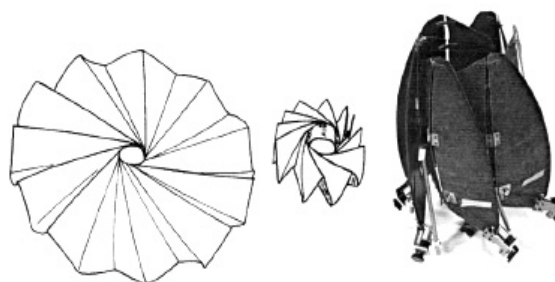
“A crescente aceleração da mobilidade funcional exige que a arquitectura seja entendida como uma obra aberta. Nesse sentido, para responder às novas necessidades de uma sociedade em permanente mutação, é necessário uma intervenção intensiva em conteúdo, sobrepondo à arquitectura perene valores actuais de mutabilidade e comunicação. Para reforçar a ideia de efemeridade, dentro de uma arquitectura tendencialmente perene, devem-se criar espaços flexíveis e adaptáveis, comprometidos com o ritmo de vida contemporâneo, com os recursos da sociedade e com as inovações tecnológicas de um futuro próximo.”¹

A citação referida é relevante pelo facto de o arquitecto João Mendes Ribeiro transpor para o contexto da arquitectura contemporânea as manifestações práticas e teóricas do início do século XX, especificamente as do arquitecto Van Doesburg da década de 20, que formula a teoria que designa de “estruturação elementar”. Nela, refere que *“a nova arquitectura é aberta. O conjunto existe num espaço que se divide, correspondendo às distintas exigências funcionais.”²*

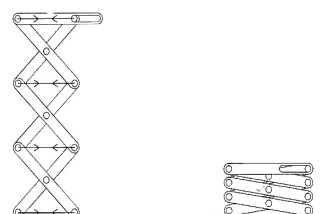
O recurso a paredes móveis na habitação justificou-se por esses motivos. Estes sistemas adoptados na construção japonesa do século XVI – como o Palácio *Katzura* – são retomados na América e Europa no período correspondente ao processo da industrialização, nos quais os arquitectos como Van Doesburg, com a casa *Schröder de Gerrit Rietveld*, 1924, ou Mies Van der Rohe com, o bloco para habitação colectiva em Stuttgart, na *Weissenhof Siedlung*, 1927, são exemplos desta abordagem à questão da habitação. São propostas que contemplam a disposição variável do interior da casa através do recurso a paredes divisórias móveis utilizadas segundo as necessidades do utente.

1. João Mendes Ribeiro, Março/Abril 2010, Novas Perspectivas Críticas, arquitectos, artistas, docentes, críticos e comissários, *ARQ|a Práticas sustentáveis*, nº 77, pp. 43

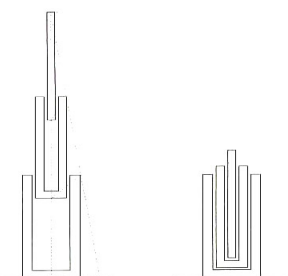
2. Sigfried Giedion, *Raum, Zeit, Architektur: die Entstehung einer neuen Tradition*, Basel u.a.: Birkhäuser, 2000, pp. 74



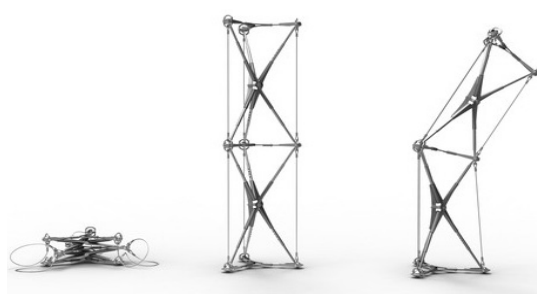
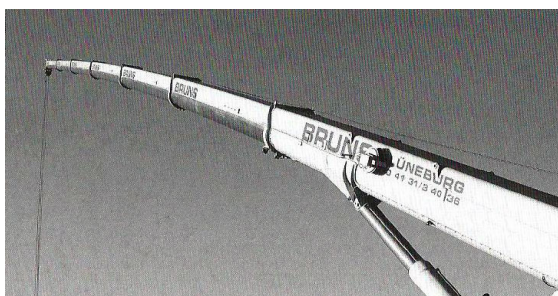
49. *deployable antenna*, equipamento para instalação lunar



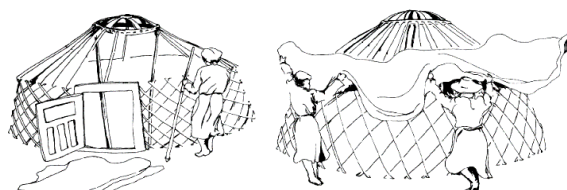
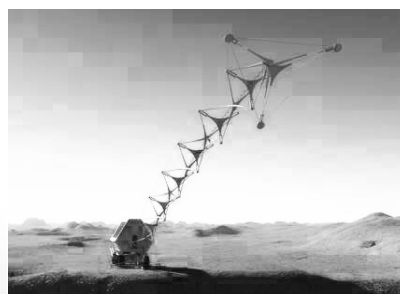
50. *scissor lift*, plataforma elevatória



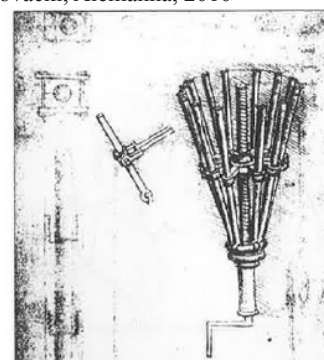
51. *grua*



52. *Bridging Mars*, proposta para instalação em Marte, Zoran Novacki, Alemanha, 2010



53. *yurts*, construção indígena



54. estudos de Leonardo Da Vinci

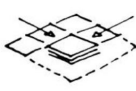
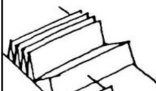
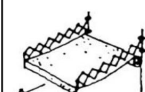
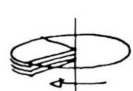
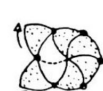
Hoje em dia as estruturas cinéticas incluem um grupo amplo de construções que – pelos mecanismos de movimento interno que incorporam – têm a capacidade de se deslocar e/ou transformar, passando de configurações pequenas, fechadas e retraídas a configurações muito maiores, abertas. “São geralmente designadas como estruturas cinéticas, embora também possam ser conhecidas como extensíveis, expansíveis, convertíveis, retrácteis ou transformáveis – dependendo da categorização mais específica.”³ Podem ser implementadas segundo diferentes níveis de controlo artificial: quer por mecanismos simples autónomos em que a fonte de energia não é eléctrica mas sim manual; quer por sistemas de sensores computadorizados e por isso mais complexos, dependentes de tecnologia e equipamento especializados. São aspectos que, a nível técnico escapam às competências do utilizador e a nível económico e ambiental pesam mais no consumo de recursos do que os sistemas manuais.

Actualmente, as principais áreas de aplicação de sistemas cinéticos incluem o campo da engenharia robótica, da indústria aeroespacial e o campo da arquitectura. Adequam-se a criar recintos, cobrir espaços desportivos ou de espectáculos, montar instalações de uso militar, civil, gerar superfícies para captação de energia na Terra ou no espaço, formar depósitos ou contentores ou constituir elementos auxiliares como escadas, antenas, suportes publicitários, auxiliares de construção ou pontes. No âmbito da arquitectura contemporânea a maior parte das estruturas cinéticas têm uma localização permanente, apesar de serem transportáveis.

O princípio de objectos transformáveis tem sido aplicado de forma pontual ao longo do percurso cronológico descrito desde a etapa Pré-Histórica, entre os quais destaco os *yurts* e o mecanismo “guarda-chuva” explorado por Leonardo Da Vinci pela relação dos respectivos sistemas com as soluções posteriormente exploradas a partir da segunda metade do século XX, etapa que incide numa investigação incisiva sobre o tema da cinética. A referência a estes sistemas será retomada no capítulo “casos de estudo”.

3. Niels de Temmerman, *Design and analysis of deployable bar structures for mobile architectural applications*, VRIJE, Bruxelas, 2007, pp. 2

Do ponto de vista técnico, a classificação dos sistemas cinéticos considera critérios como “tipo de movimento” – correspondentes a movimentos de translação e rotação – e “direcção de movimento” que, por sua vez, correspondem a uma deslocação paralela, central, circular ou periférica dos elementos constituintes. A categorização destes sistemas aplicados em coberturas está sistematizada numa tabela por Frei Otto que os explora na década de 70, e pretende sintetizar os exemplos a abordar de seguida. São coberturas que divido em dois grupos distintos, que designo “transformáveis simples” e “transformáveis compostas”.

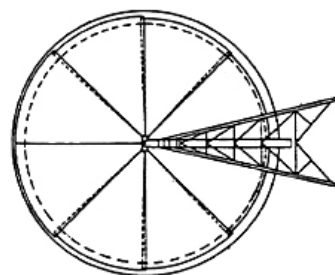
tipo de movimento	direcção do movimento			
	paralelo	central	circular	periférico
translação				
rotação + translação				
				
rotação				

55. tabela de sistemas de construção cinéticos,

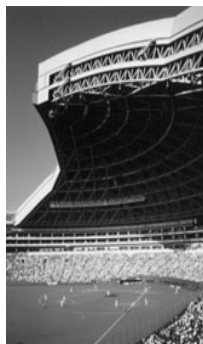
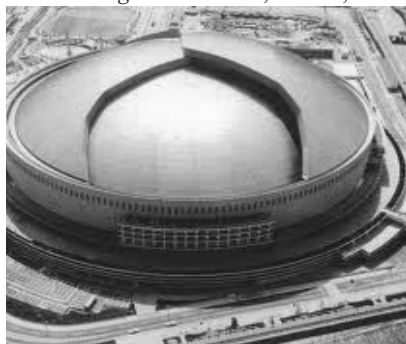
Frei Otto, 1970

1.1.2.1 estruturas transformáveis simples

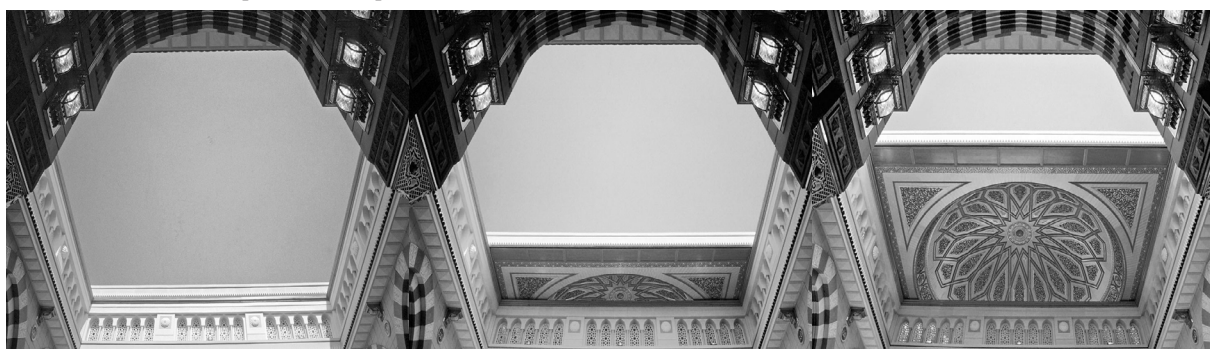
Dentro das coberturas transformáveis simples existem as que funcionam por movimentos de translação, e as que funcionam por movimentos de rotação. Como exemplos de sistemas translação incluo as coberturas dos equipamentos desportivos *Pittsburg Civic Arena*, 1961, nos Estados Unidos e *Fukuoka Stadium*, 1993, no Japão, a proposta *Sliding Domes*, 1992, para um equipamento religioso na Arábia Saudita, a proposta *Sliding House*, 2009, para uma casa na Inglaterra. São coberturas que assentam e deslizam em calhas fixas ao longo da cobertura do edifício.



56. *Pittsburgh Civic Arena*, E.U.A., 1961



57. *Fukuoka Stadium*, Japão, 1993: implantação e detalhe da cobertura



58. *Sliding Domes*, Frei Otto, Arábia Saudita, 1992



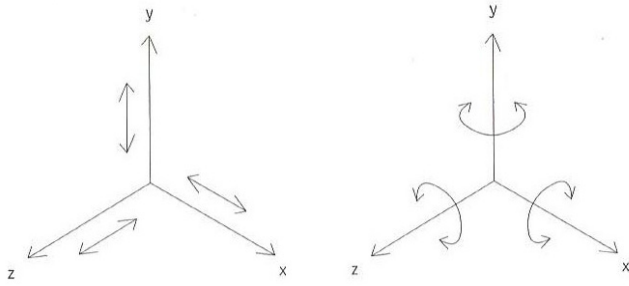
59. *Sliding House*, dRMM Architects, Inglaterra, 2009

O equipamento desportivo *Pittsburgh Civic Arena* é constituído por uma cobertura cinética que vence um vão de 130 metros correspondente a uma cúpula treliçada revestida a placas rígidas que deslizam em torno de um eixo central, suportadas por um mastro treliçado com 80m altura. A cobertura, segmentada em 8 partes com placas que no total rondam as 2500 toneladas, abre-se em dois minutos.

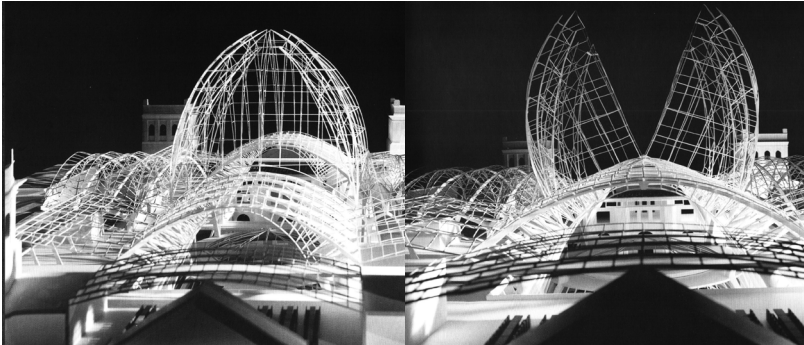
Na cobertura do estádio *Fukuoka* o sistema é idêntico. A cúpula é dividida em três secções – uma fixa e duas que deslizam – e tem espessura de 4 metros, que no peso total ronda as 12 000 toneladas. A cobertura abre e fecha em 20 minutos. O inconveniente deste tipo de coberturas está no peso próprio da estrutura em relação ao desempenho que ela tem: se a cúpula corresponde a uma forma eficaz quanto à distribuição das cargas – porque sem momentos flectores devido à sua forma côncava e área de secção considerável – quando estratificada em placas, por solicitações de movimento, cada placa é mais susceptível de flectir, o que implica uma estrutura auxiliar reforçada que considere as respectivas cargas. Uma alternativa ao sistema treliçado para cúpulas é a fibra de vidro, material aplicado para sistemas de construção aerodinâmica e por isso mais leve. Nesse sentido destaco a proposta *Sliding Domes*, de Frei Otto, para a Mesquita *Prophet's Holy* em Medina, na Arábia Saudita. Corresponde a 27 cúpulas de 18m de diâmetro e com peso de 2 toneladas. Abrem e fecham em 1 minuto. É uma intervenção que pretende regular de forma passiva a temperatura no interior do edifício circundante ao pátio, sem comprometer a sua iluminação natural.



A *Sliding House* é uma variante do sistema de Frei Otto. A cobertura amovível que se sobrepõe ao edifício fixo ronda as 20 toneladas e tem 16 metros de comprimento, 6m de largura e 7m de altura. Desliza através de um sistema eléctrico motorizado.



60. translação e rotação de um corpo no espaço



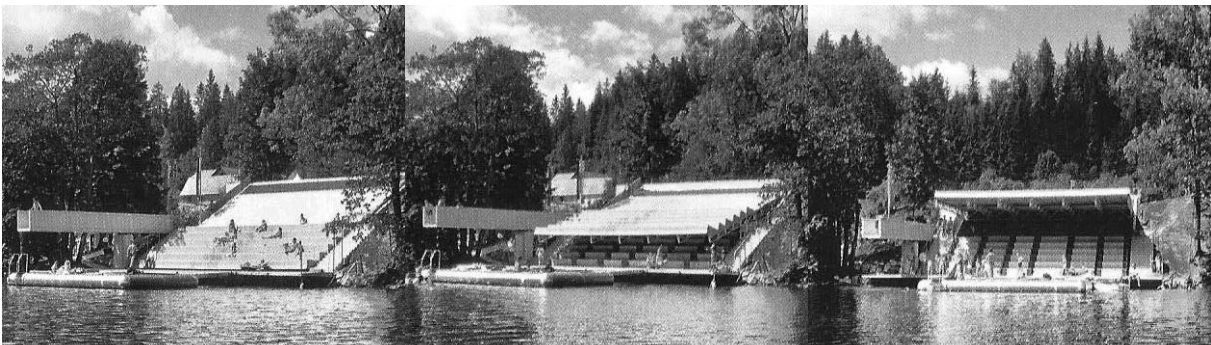
61. cúpula para edifício *Reichstag*, Santiago Calatrava, Alemanha, 1993



61. *Venezuela Pavilion*, Pavilhão para Exposição Internacional em Hannover, Alemanha, Frei Otto, 2000



62. *Arena Seating*, L.S.U.

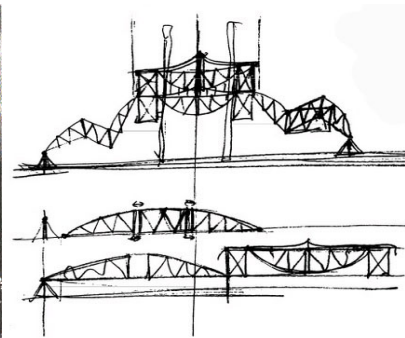
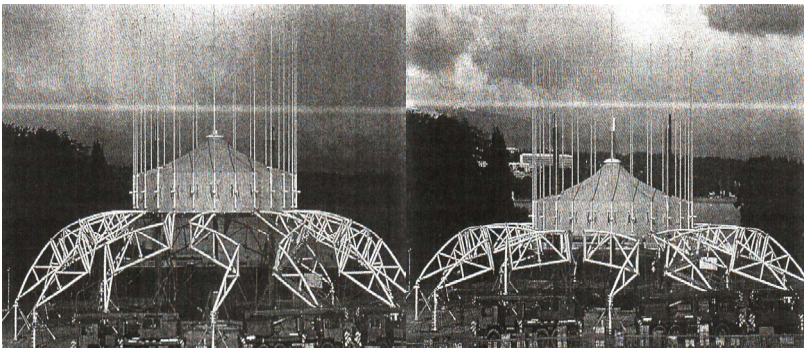
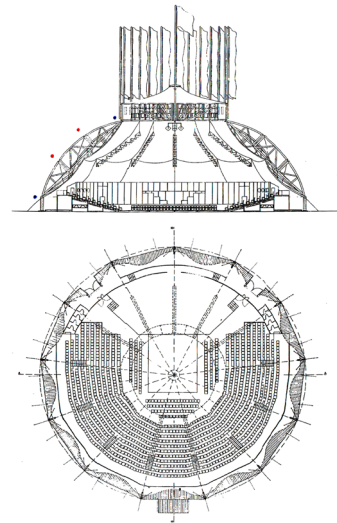
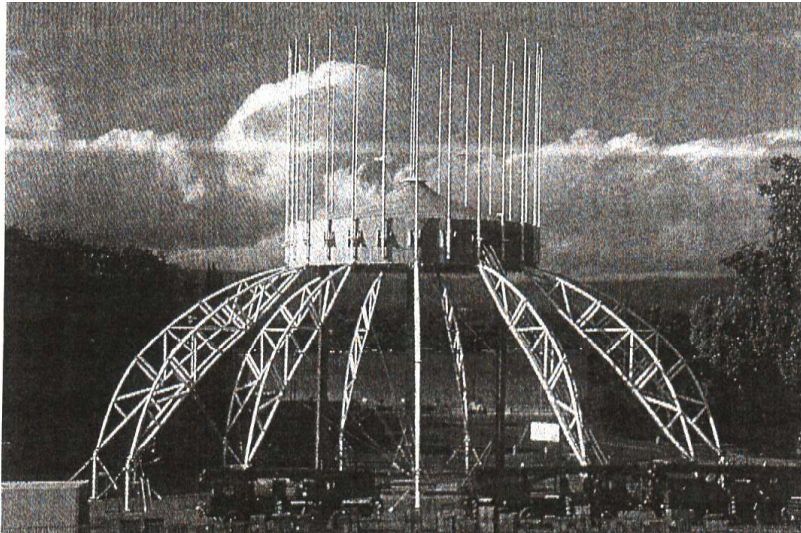


63. *Lakeside Stage*, Áustria, 2004.

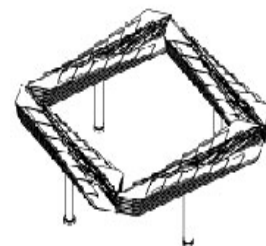
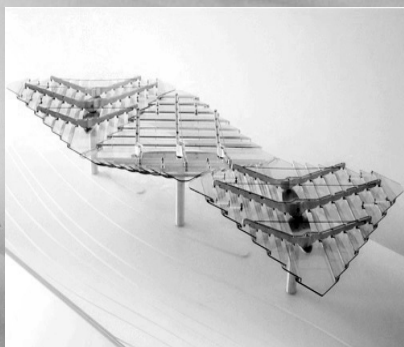
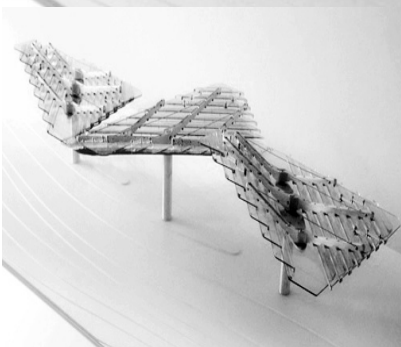
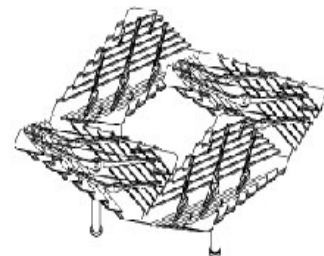
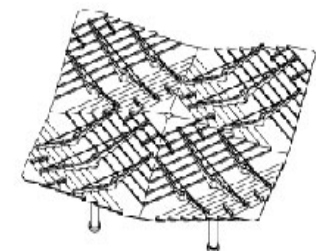
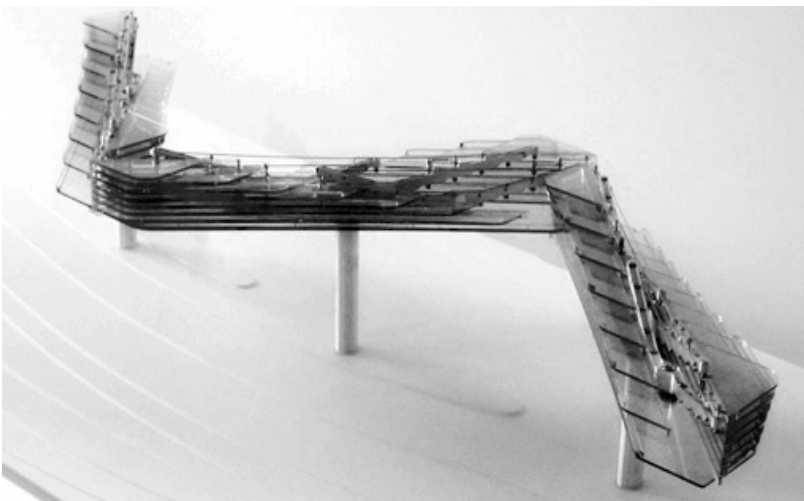
Do ponto de vista mecânico os exemplos referidos têm como denominador comum o movimento de translação, que corresponde à deslocação linear no espaço paralela ao respectivo eixo coordenado. Por outro lado, existem igualmente exemplos de sistemas cinéticos cujo tipo de movimento é a rotação, em que a deslocação do objecto no espaço é feita em torno do respectivo eixo coordenado. Como exemplos de sistemas de rotação incluo a cúpula para a reabilitação do edifício *Reichstag* na Alemanha proposta pelo arquitecto Santiago Calatrava em 1993, a cobertura do Pavilhão da Venezuela para Exposição Internacional na Alemanha em 2000 desenvolvida por Frei Otto, a cobertura *Arena Seating* para equipamento desportivo proposto pela escola de arquitectura LSU, e a proposta *Lakeside stage* em 2004, na Áustria, para apoio a festivais de Verão e a actividades de Inverno no lago, que está congelado.

A cúpula cinética que Calatrava propõe, em 1993, para reabilitar o edifício *Reichstag*, apesar de não ter sido uma solução executada – a que ganhou foi a de Foster que é estática – insinua-se como um sistema cinético simples do ponto de vista mecânico: a solução consiste numa cúpula de 18 metros de vão, constituída por peças rígidas treliçadas, prevista para se abrir e fechar através de um sistema hidráulico. Um sistema idêntico ao que viria ser executado para o edifício *Reichstag* é o da cobertura do Pavilhão da Venezuela para a Expo 2000 na Alemanha que, pelo facto de se inverter a posição das peças e as colocar de forma radial a duas cotas distintas em torno de um mastro central, o resultado formal insinua a forma de uma palmeira. A posição da cobertura relaciona-se com a amplitude permitida pelo mecanismo de movimento associado e cobre cerca de 1500m² de área de superfície, sendo constituída por 16 peças rígidas treliçadas – cada uma com 10m de comprimento. Do ponto de vista técnico assemelha-se ao sistema “guarda-chuva” comum mas com os movimentos opostos. A proposta *Arena seating* consiste num arco em consola suportado na parte de trás da bancada do estádio. A cobertura é constituída por uma membrana suportada em tirantes de aço – que se cruzam em diagonais – e nas duas vigas curvas treliçadas. A cobertura move-se através de um sistema hidráulico incorporado na sua base. A proposta *Lakeside stage* segue o mesmo princípio de funcionamento da “Arena Seating”. Corresponde a uma superfície plana com 13 x 13m, que funciona enquanto bancada e enquanto cobertura, cobrindo cerca de 170m². O movimento da cobertura é accionado através de um sistema hidráulico.

Com estas referências pretendi demonstrar a diversidade tipológica permitida para estruturas rígidas que contemplam sistemas cinéticos constituídos quer por movimentos de rotação, quer por movimentos de translação: são estruturas com mecanismos de movimento que permitem alterar a posição mas não a configuração da estrutura global, porque não conjugam num mesmo sistema os dois tipos de movimento – translação e rotação.



64. *Mobile Auditorium*, Mario Botta, 1989; planta, corte; desenhos do autor.



65. *Adaptive shading explanade*, Chuck Hoberman, Londres, 2006;

Michael Schumacher refere que “*nos sistemas cinéticos os movimentos mecânicos podem reduzir-se a dois tipos de movimento: rotação e translação, ou a conjugação de ambos. A particularidade da conjugação destes dois movimentos é a capacidade que confere ao sistema estrutural em alterar a sua configuração espacial consideravelmente. Por exemplo, uma área de superfície extensa pode ser recolhida para um volume compacto.*”⁴

1.1.2.2 estruturas transformáveis compostas

A conjugação numa só estrutura de sistemas de translação com sistemas de rotação introduz a categoria das estruturas que designei “transformáveis compostas”, estruturas que passam de um estado recolhido para estado expandido pré-configurado. São um grupo mais específico das estruturas cinéticas, pelo facto de permitirem a conversão formal. Chuck Hoberman, Emilio Pérez Piñero, Mario Botta, Félix Escrig, Fuller e Frei Otto são exemplos de arquitectos que exploram este tipo de sistemas. São sistemas particularmente adequados para estruturas transportáveis de grande dimensão, pelo facto de a grande variação formal do sistema conjunto das peças otimizar o armazenamento. Um exemplo ilustrativo é a proposta *Mobile Auditorium* de Mario Botta, em 1989, para o 700º aniversário da Confederação Suíça. A necessidade de um recinto que considerasse grande concentração de pessoas num espaço para actividades lúdicas itinerantes, resultou numa solução inspirada na tipologia de uma tenda de circo. A tenda é uma estrutura treliçada em aço constituída por um anel central, ao qual se ligam treze elementos auto-portantes dispostos radialmente, de maneira a configurar uma circunferência em planta. Cada elemento é um conjunto de três peças articuladas – através de rótulas esféricas – correspondentes a um arco tripartido que se expande ou recolhe em forma de “Z”, alterando assim a altura da tenda e otimizando o seu armazenamento quando rebatido. A estrutura cobre cerca de 2600m² de área de superfície.

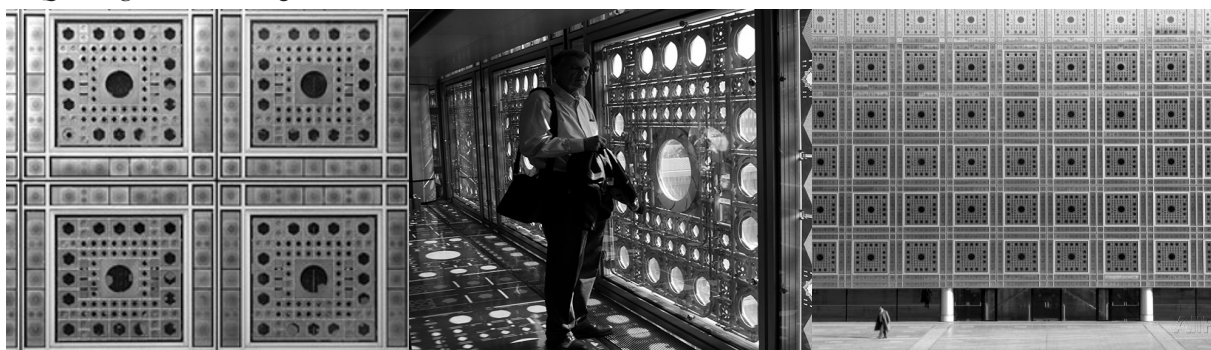
Todavia, as estruturas transformáveis compostas são igualmente compatíveis com superfícies rígidas, como é exemplo a cobertura *Adaptive shading explanade* desenvolvida pelo arquitecto Chuck Hoberman. É um protótipo de dimensão reduzida demonstrado em Londres, 2006, no fórum *Building Centre Trust*. Cada módulo da cobertura é constituído por superfícies rígidas que se sobrepõem: “*estes módulos podem organizar-se segundo uma grande variedade de disposições, desde uma estrutura rectilínea até uma configuração quadrada. É um sistema que pode aplicar-se isolado ou integrado no edificado, enquanto fachada ou cobertura.*”⁵

4. Michael Schumacher, *Move: architecture in motion, dynamic components and elements*, Basel, Birkhauser, 2010. pp. 44

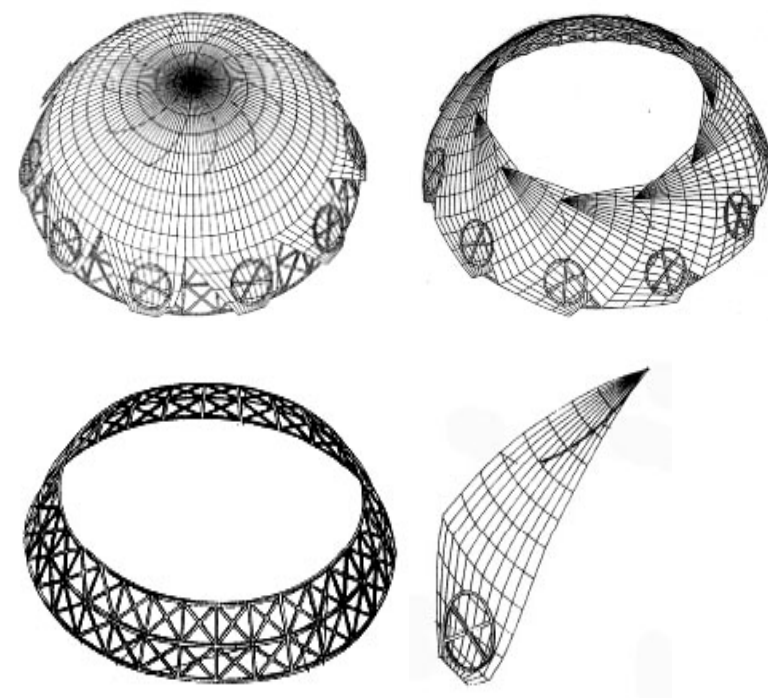
5. Chuck Hoberman, *Company profile and selected works: 1990-2012*.



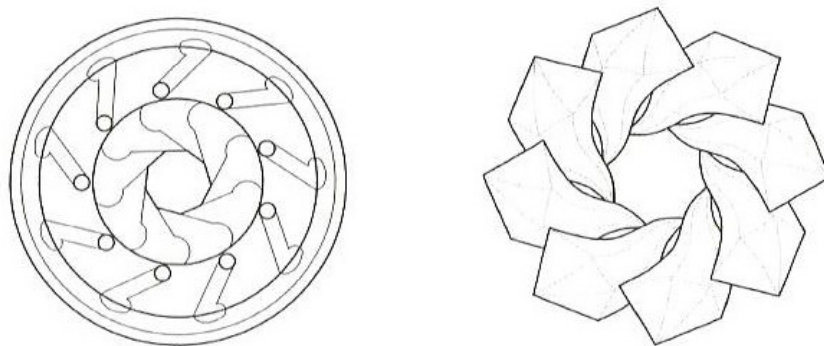
66. *Qi Zhong Stadium*, Shanghai, 2006



67. “*Instituto do Mundo Árabe*”, Jean Nouvel, Paris, 1986



68. “*Cúpula em diafragma*”, protótipo concebido por Emilio Pérez Piñero, década de 60



69. sistemas diafragma

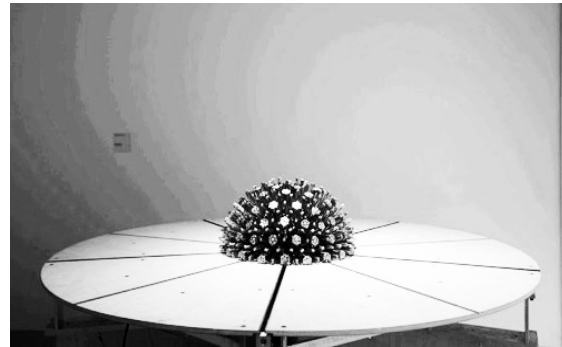
Outro grupo de estruturas transformáveis compostas corresponde aos sistemas “tipo diafragma”. São mecanismos baseados no princípio de funcionamento dos obturadores das máquinas fotográficas, no qual o diafragma fotográfico é o dispositivo que regula a abertura de um sistema óptico.

A cobertura proposta em 2006 para o estádio *Qi Zhong*, em Shangai, e a fachada desenvolvida por Jean Nouvel em 1986 para o Instituto do Mundo Árabe, em Paris, são sistemas constituídos por um conjunto de peças rígidas justapostas, que evidenciam o princípio de funcionamento dos sistemas em diafragma. A fachada corresponde a um módulo de pequenas dimensões que se repete de forma a cobrir a correspondente área de superfície; a cobertura corresponde a uma unidade ampliada desse módulo de forma a cobrir uma área de superfície com cerca de 350 m².

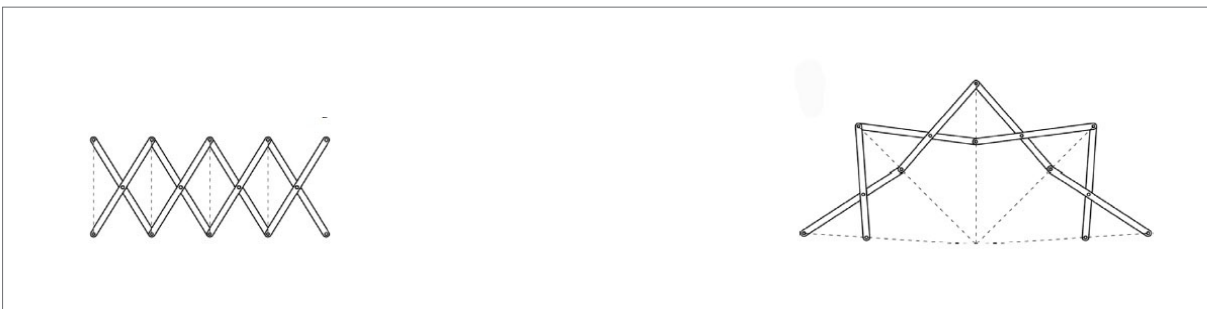
O arquitecto Emilio Pérez Piñero estudara este princípio aplicado em cúpulas, no protótipo que desenvolve na década de 60. Desenvolveu uma cúpula constituída por uma série de superfícies rígidas com capacidade de rodar em torno de um eixo perpendicular à esfera, o princípio dos sistemas em diafragma. Quando as superfícies rodam é criada uma abertura no centro da cúpula. Durante o processo de abertura e encerramento da estrutura todas as superfícies mostram uma sobreposição, excepto na posição completamente fechada correspondente a uma superfície curva.



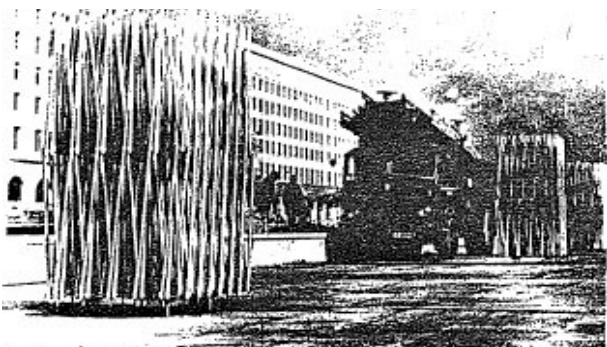
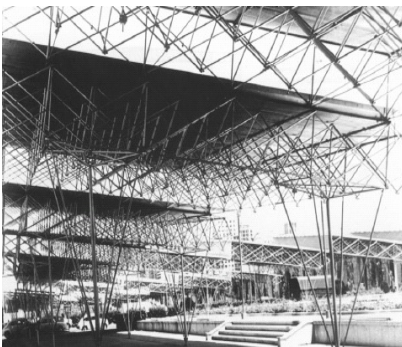
70. *Expanding geodesic dome*, Chuck Hoberman, Liberty State Park, New Jersey, E.U.A, 1991;



71. *Expanding geodesic dome*, Chuck Hoberman, Centro Georges Pompidou, Paris, França, 1997



72. sistema pantógrafo; o mesmo sistema permite várias configurações.



73. *Pabellon Transportable para Exposiciones*, 1964



74. *Cubierta Desplegable de la Piscina San Pablo*, 1996

Um sistema alternativo ao de diafragma é o sistema em pantógrafo, como é exemplo a proposta *Expanding Geodesic Dome* de Hoberman, desenvolvida em 1991 nos E.U.A. O mesmo sistema foi exposto em 1997 em Paris, no Centro *Georges Pompidou*. É uma cúpula constituída por várias unidades “tipo pantógrafo”, com a capacidade de incorporar uma membrana como revestimento.

Vários investigadores propuseram estruturas em forma de cúpula com capacidade de se retraírem no sentido do seu perímetro, possibilitadas por sistemas em diafragma ou por sistemas em pantógrafo. A singularidade dos sistemas em pantógrafo está no facto de a mesma “rede linear” possibilitar várias configurações, o que significa que a mesma estrutura pode aplicar-se enquanto cobertura plana – como é exemplo o Pavilhão para exposições itinerantes de Pérez Piñero, em 1964 – ou enquanto cobertura de superfície curva - como é exemplo a cobertura proposta por Félix Escrig para a piscina *San Pablo*, em Sevilha, 1996. Acrescenta-se a particularidade de estes sistemas em estado recolhido obterem a forma de uma peça rectilínea, o que optimiza o armazenamento e facilita a logística de transporte.

75. coberturas para o pátio de entrada da Mesquita *Al Hussein*, Cairo, Egípto, 2000



76. proposta para *Hotel d'Angleterre*, Lausanne, Suíça, 2000



77. pátio interior do Castelo de *Wasseralesfingen*, Alemanha, 1994



78. coberturas para pátio de entrada de aeroporto *Royal Terminal*, Jeddah, K.S.A, 2007



O princípio de estruturas que se recolhem para uma peça rectilínea introduz os sistemas tipo “guarda-chuva”, explorados por Frei Otto desde a década de 50. São exemplo propostas que demonstram a amplitude dos domínios de aplicação destas coberturas, que funcionam como complemento a equipamentos públicos.

No que se refere a aspectos técnicos, contrariamente aos sistemas em diafragma – que apenas permitem a recolha e expansão da cobertura no sentido do seu próprio perímetro – os sistemas tipo pantógrafo e tipo guarda-chuva em estado recolhido obtêm a forma de uma peça rectilínea, com a particularidade de serem estruturas enquanto peça única. São características que optimizam a logística de transporte e diminuem o processo de montagem, muitas vezes subordinado a equipas de montagem especializada. Acresce-se o facto de serem estruturas que cumprem o papel das constituídas por superfícies rígidas, quando se incorpora uma membrana ou uma placa como revestimento, com vantagens no peso próprio da estrutura que é menor. São estruturas que permitem alcançar vãos de grande dimensão com o mínimo de pontos de ancoragem. No que se refere a aspectos operacionais permitem um espectro alargado de domínios de aplicação, enquanto complemento ao edificado ou isoladas deste, porque são sistemas auto portantes. São aspectos que justificam a selecção das estruturas tipo pantógrafo e tipo guarda-chuva como casos de estudo, abordados no capítulo “casos de estudo”.

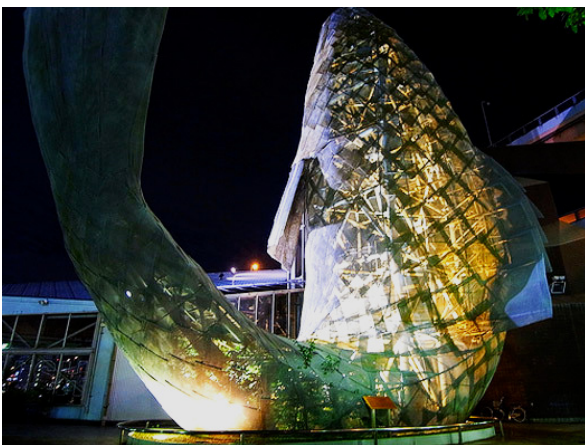


79. Portal para Exposição Internacional de Paris de 1900, Renet Binet, 1900



80. “Big Duck”, Martin Mauer, 1931.

edifício construído por um agricultor
empreendedor, Martin Mauer.
O edifício teve várias localizações.



81. restaurante “Fish Dance”, Frank Ghery, Kobe, Japão, 1986



82. “Reyes House”, Eugene Tsui, Califórnia, E.U.A, 1991



capítulo 2. influência biomimética

A relação da arquitectura com a natureza adquire vários níveis de aproximação, que incluem: a forma - aproximação figurativa; a concepção - aproximação construtiva. São aproximações distintas que têm descrito o percurso cronológico secular desde as primeiras atitudes de intervenção do ser humano na natureza até à actualidade. No entanto, a relação da arquitectura com a natureza no que se refere à aproximação construtiva, tem-se revelado mais válida do que a aproximação formal enquanto estratégia. Nas palavras de Bruno Zevi, a mimética da forma para concepção de um edifício corresponde a um tipo de abordagem primário à natureza.¹ Não obstante, importa referir intervenções que, apesar de pontuais, demonstram este tipo de abordagem morfológica à natureza, com especial incidência a partir da etapa correspondente à industrialização: enquanto edifícios expositivos – como é exemplo o portal de Renet Binet para a Exposição Internacional de Paris, em 1900, com a forma dos organismos *radiolária*; enquanto equipamentos para comércio – como é exemplo a construção em forma de pato, incluído no discurso crítico de Robert Venturi, em 1931, ou o restaurante *Fish Dance* de Frank Ghery, em 1986, com a forma de um peixe; enquanto complemento a habitação – como é exemplo a cobertura cinética com a forma de asas de libelinha na proposta *Reyes House*, em 1991, do arquitecto Eugene Tsui.

1. Bruno Zevi, *Towards an Organic Architecture*, Londres, Faber & Faber, 1950. pp. 37

Estes exemplos de cópias de elementos naturais com as dimensões aumentadas, do ponto de vista construtivo não retiram quaisquer princípios dos mecanismos naturais. Diferem da abordagem construtiva à natureza, designada na década de 50 pelo biofísico Otto Schmitt como “biomimética” e integrada – pelo doutor e engenheiro Jack E. Steele² em 1958. Segundo ele, o objectivo desta ciência “*é o estudo de características, comportamentos e mecanismos dos seres vivos no sentido de desenvolver sistemas artificiais com os mesmos princípios de funcionamento.*”³ As próteses que Steel mimetiza são um dos exemplos de aplicação da construção biónica. No entanto a oficialização do termo “biónica” surge em 1960 na conferência *Annual National Aeronautic Electronics* e alastra-se ao campo da arquitectura pelo contributo do arquitecto Frei Otto, que o designa de “bioarquitectura” e o descreve como “*a aplicação de analogias provenientes da Natureza para o desenvolvimento de estruturas e sistemas construtivos.*”⁴ A partir da década de 60 a par da tecnologia cada vez mais especializada ramificam-se as terminologias da biónica que incluem a “biotécnica” ou a “biomecânica”. Contudo, o denominador comum será o estudo de sistemas e processos naturais numa perspectiva funcional, não sendo a aproximação formal o objectivo, focada no estudo de mecanismos e estratégias derivadas de seres vivos e na viabilidade dessas soluções em domínios de aplicação que incluem a prática construtiva em vários campos como design, engenharia e arquitectura. O objectivo será o de obter soluções mais optimizadas comparativamente às que existem sem essa influência. O termo “biomimética” é aqui utilizado para referir a construção que se cruza com o campo da biologia.

Embora “biomimética” seja uma terminologia adoptada recentemente a forma de interacção do ser humano com o mundo natural foi, desde sempre, baseada no mimetismo. No âmbito da actividade construtiva será focada sucintamente a forma como o ser humano tem apreendido princípios naturais de funcionamento estrutural ao longo do tempo: pela cópia dedutiva dos seus processos e sistemas; por métodos de medição rigorosa; por recurso a modelos físicos; por cálculo analítico; por métodos de computação. É neste percurso histórico que arquitectos como Leonardo Da Vinci, Antoni Gaudi, Joseph Paxton, Mies Van der Rohe, Buckminster Fuller e Frei Otto assumem especial interesse nesta dissertação pelas tecnologias e soluções derivadas de elementos naturais que desenvolvem.

2. Jack E. Steele (1924-2009) formado em engenharia geral e medicina, serviu o exército dos Estados Unidos durante o período de 1943-46 e posteriormente a Força Aérea dos Estados Unidos desde 1951 até 1971. Durante a sua carreira militar investigou os efeitos da tensão de movimentos, de sons e de rajadas de vento, tal como a aplicação de modelos biológicos à engenharia aeronáutica.

3. Lucien Gerardin, *La Biónica*, Madrid, Ediciones Guadamarra, 1968, pp. 11

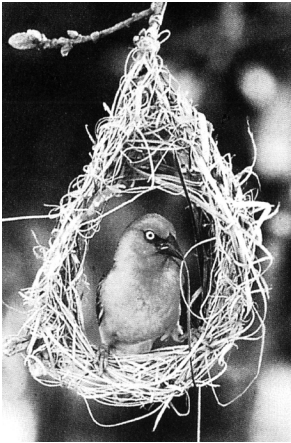
4. Mauro Costa, *Analogias Biológicas en la arquitectura – del acercamiento biónico hacia los programas de lo biodigital*, Barcelona, ESARQ-UIC, 2008, pp.27

Pretendo simultaneamente demonstrar como o progressivo impacto do edificado na paisagem insinuou o crescente controlo físico da mesma – com especial incidência na etapa da industrialização, decorrente do ritmo de produção e dos modelos de ocupação no solo – e conduziu à actual degradação ambiental do planeta e escassez de recursos.

2.1 arquitectura e biologia

Do ponto de vista estrutural, tanto os elementos biológicos como a nossa prática construtiva se traduzem em matéria com a necessidade comum de resistir a forças impostas por fenómenos naturais. São forças externas que actuam e alteram toda a matéria que constitui o planeta, nas quais se incluem a pressão gravítica como o denominador comum constante e os agentes climáticos como acções variáveis, como a velocidade do vento, a pressão da água, da neve, da chuva, etc. Do ponto de vista construtivo “*uma estrutura é considerada um elemento ou um número de elementos a trabalhar em conjunto, fornecendo rigidez, força e estabilidade para se manter em equilíbrio*”¹, ou seja, que mantenha a sua posição no espaço mesmo sob acção de um determinado sistema de forças externas. Nos organismos vivos – animais e vegetais – é um processo natural em que a resistência é sinónimo de uma evolução cronológica multimilenar de adaptação ao meio. Nos sistemas inertes – minerais – a adaptação deriva de movimentos internos moleculares mas não há evolução, porque não há necessidade de sobrevivência. Na nossa actividade construtiva a resistência é um processo artificial validado por tentativa e erro, no qual se vão sistematizando secularmente os procedimentos que melhor conduzem à estabilidade de um sistema estrutural.

1. Cf. SANDAKER, Bjørn, *The structural basis of architecture*, pp. 26



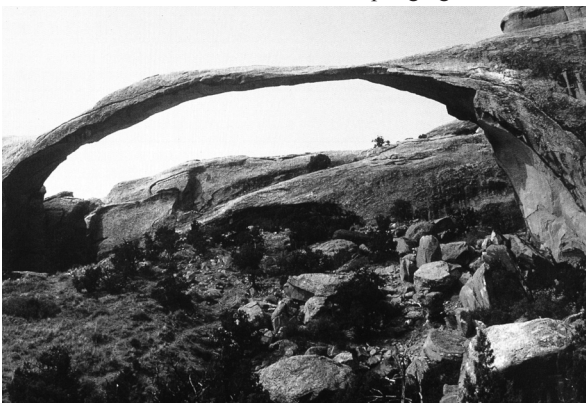
83. ninho de pássaro e abrigo primitivo



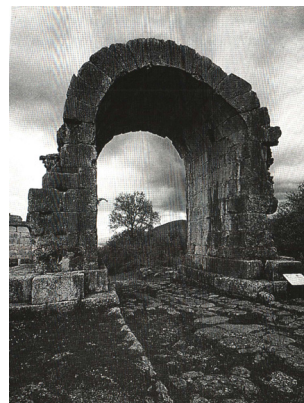
84. rochas sedimentares e Zigurate da cidade de UR, Iraque, III a. C.



85. troncos de árvore e colunas de templo grego



86. arco natural, National Monument Park, Utah, E.U.A;



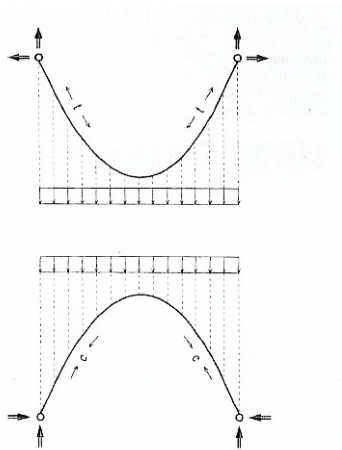
87. arco na cidade romana de Carsulæ, Tenri

Com ou sem função determinada, tal como os planetas e estrelas à escala cósmica, os sistemas minerais, animais e vegetais assumem-se à escala humana como estruturas capazes de resistir às forças externas que actuam na sua própria massa, e por isso modelos de equilíbrio e inspiração para a nossa prática construtiva ao longo do tempo. É nesse sentido que o arquitecto Paolo Portoghesi, no livro *Nature and Architecture*², estabelece uma relação entre arquitectura e natureza, para justificar que as primeiras atitudes de intervenção do ser humano na paisagem se baseiam na observação e imitação das formas e processos construtivos naturais. Segundo ele, verifica-se engenho na criação e adopção de processos construtivos que se traduzem nas formas naturais observadas, assistindo-se simultaneamente à progressiva autonomia do construído face à envolvente natural: os abrigos provisórios de pequenas dimensões, dependentes da envolvente natural como refúgio, evoluem para construções definitivas de maior dimensão à medida que a lógica de apropriação de um espaço se vai consolidando. Nesse sentido, alarga-se o campo de acção através da sobreposição de blocos sobre a forma de muros, que secularmente vão evoluindo para pilares e arcos: surge a geometria, sobrepondo-se as técnicas de construção baseadas em métodos de medição rigorosa às anteriores estratégias dedutivas com base em impressões sensoriais dos elementos naturais observados. Apreende-se empiricamente que a simetria permite melhor estabilidade da forma, aspecto que irá justificar o sentido compositivo dos elementos e fenómenos naturais e alertar para uma maior consciência da resistência /força de uma estrutura construída.

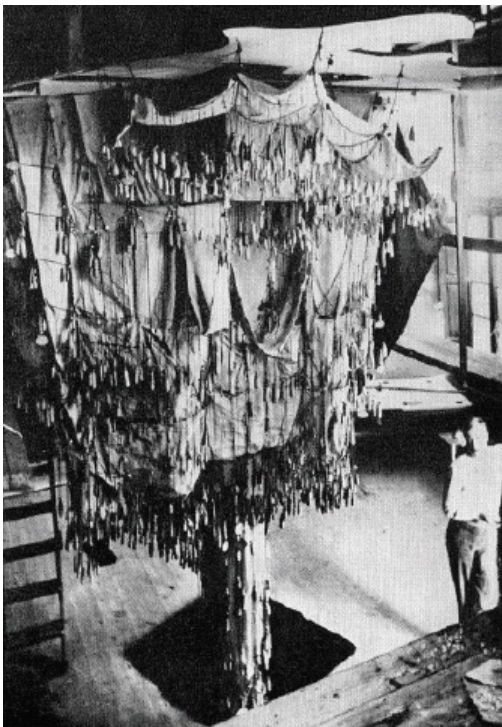
2. Paolo Portoghesi, *Nature and architecture*, Milano: Skira, 2000;



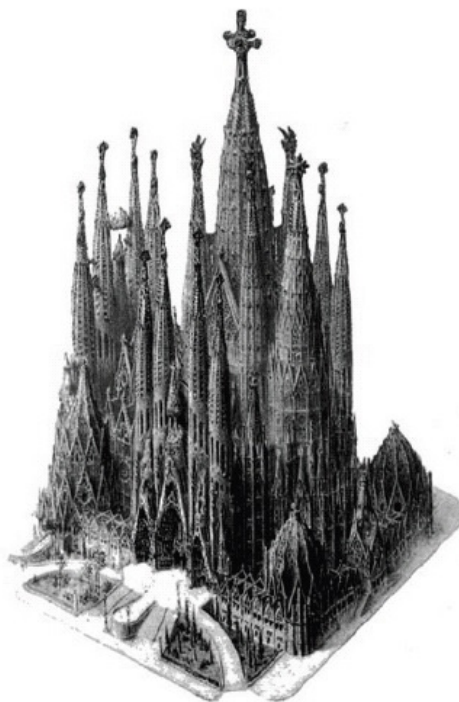
88. testes de forças através de modelos físicos, Leonardo Da Vinci



89. princípio de funcionamento da catenária



90. “Sagrada Família”, Gaudí: modelo invertido construído com catenárias e o edifício construído em 1882



2.1.1 Gaudí e catenária

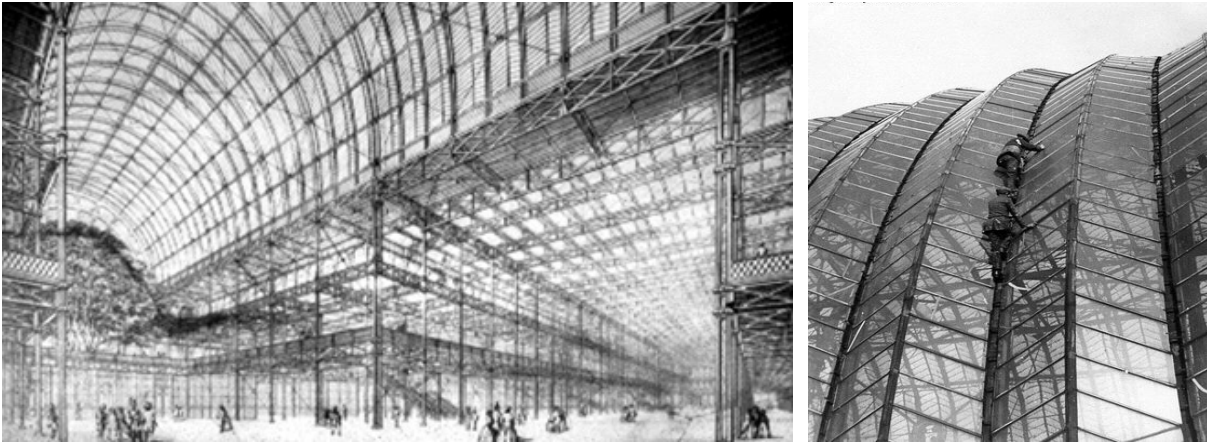
Correspondem a Leonardo Da Vinci (1452-1519) as primeiras experiências de testes de força com modelos físicos baseados em princípios de comportamento naturais. Se a primeira evidência documentada de aproximação à interpretação do comportamento mecânico de uma estrutura corresponde aos manuscritos de Da Vinci, que incluem registos de estudos de equipamento militar e de sistemas biológicos, quem irá interpretar a mecânica dos fenómenos naturais e traduzir esse processo em vectores será Newton (1642-1727), que oficializa o cálculo de forças. O contributo de Newton na interpretação da mecânica e dinâmica dos fenómenos e elementos naturais – nos quais se inclui a força da gravidade – terá repercussões no âmbito da actividade construtiva, clarificando uma maior consciência do comportamento mecânico da matéria, porque toda a matéria se subordina a forças externas. Os modelos físicos enquanto ferramenta de concepção do projecto, de teste e interpretação do comportamento da estrutura apoiam-se agora, século XVIII, em procedimentos mais assertivos e fundamentados.

É nesse sentido que os modelos de Gaudí se assumem como exemplos que insinuam a consciência das leis de Newton, que comprova que *“forças de acção e reacção têm que ser iguais e opostas para estar em equilíbrio”*³. *“Como forças de acção e reacção têm que ser iguais e opostas, forças de tracção têm que ser equilibradas por forças de compressão iguais e opostas.”*⁴ Em termos práticos, pode considerar-se que essa lei introduz o princípio da catenária como estratégia de construir arcos eficientes do ponto de vista estrutural. *“A forma da catenária corresponde a uma distribuição de forças uniforme, traduzidas numa organização simétrica.”*⁵ A curvatura equilibrada de um arco de pedra corresponde à curvatura de um fio quando apoiado nas suas extremidades. Com recurso a modelos invertidos de correntes, Gaudí compreende a curvatura análoga do arco pretendido e com essa estratégia obtém uma solução optimizada no que toca à relação peso-resistência de uma estrutura. Com esse método constrói catedrais em pedra que atingem vãos de grande dimensão em altura, como é exemplo a Catedral Sagrada Família, 1882, que ilustra a manifestação da Arte Nova em Espanha.

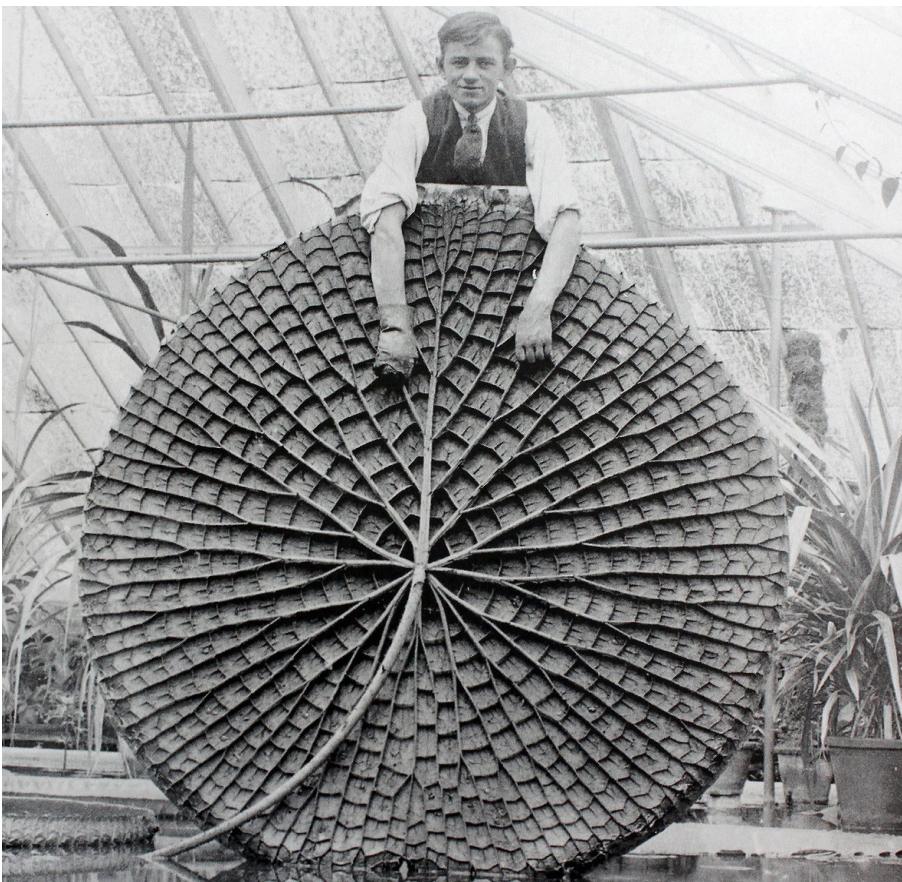
3. J. E. Gordon, *The science of structures and materials*. Nova Iorque: Scientific American Library Distributed by Freeman, 1988. pp. 17.

4. Rodrigo Moreira, *Utilização de membranas tensionadas leves na execução de estruturas especiais*, Porto, FEUP, 2008, pp.86.

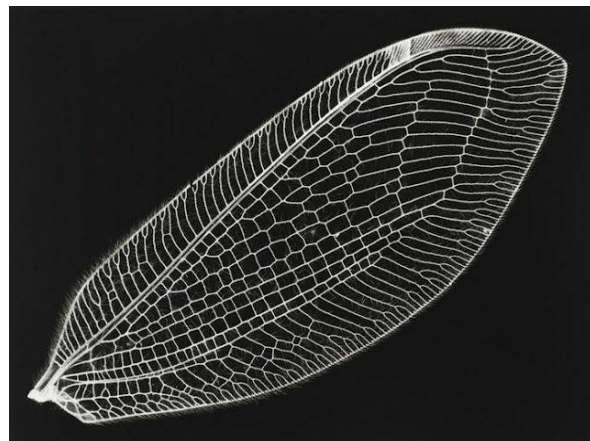
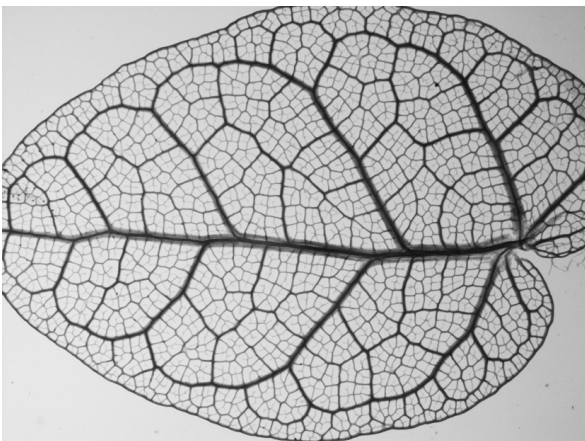
5. Pedro Gil, *Análise e dimensionamento de uma estrutura de cobertura em membrana tensa*, Porto, FEUP, 2010, pp. 87



91. “Palácio de Cristal”, Paxton, Londres, 1851; vista interior e detalhe da cobertura



92. folha *Victoria regia*, observada por Paxton



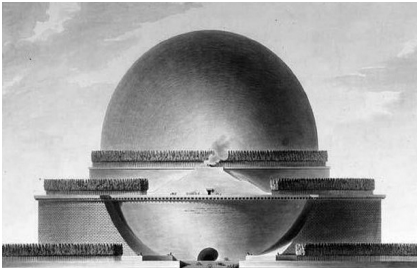
93. folha e asa de insecto; estruturas ramificadas

Com o cálculo vectorial a força dos fenómenos naturais passa a ser interpretada e compreendida, com repercussões na forma de encarar a arquitectura ao nível construtivo. Por sua vez, a construção é fortemente desenvolvida a partir do momento que surge um novo material - o ferro - como alternativa aos materiais tradicionalmente usados - pedra e madeira. O uso do ferro impulsionou a exploração de sistemas construtivos que permitiam o alcance de vãos de grande dimensão com o mínimo peso. Este facto, aliado à necessidade de adaptação da construção às condições de crescimento do modelo de cidade que emergia nas metrópoles industriais do século XVIII, como Londres ou Paris, questiona os princípios compositivos e construtivos que caracterizaram a disciplina de arquitectura até à época. São aspectos que contribuem para a alteração da sensibilidade arquitectónica com um pensamento de ruptura, onde Paxton, Fuller e Frei Otto se assumem como os principais representantes nesta investigação com propostas baseadas em princípios de comportamento naturais.

2.1.2 sistema abobadado de Paxton e a folha “victória régia”

Se Gaudi constrói catedrais em pedra, Joseph Paxton na mesma época – em Londres, no contexto de uma metrópole industrializada – constrói a cobertura abobadada em ferro do Palácio de Cristal em 1851. Curiosamente, a base de desenvolvimento para a cobertura do Palácio de Cristal fundamenta-se no princípio de concepção de sistemas naturais, nomeadamente a observação de um nenúfar – designação comum para a planta aquática *Victoria Regia* – numa óptica estrutural, enquanto objecto de transmissão de forças.

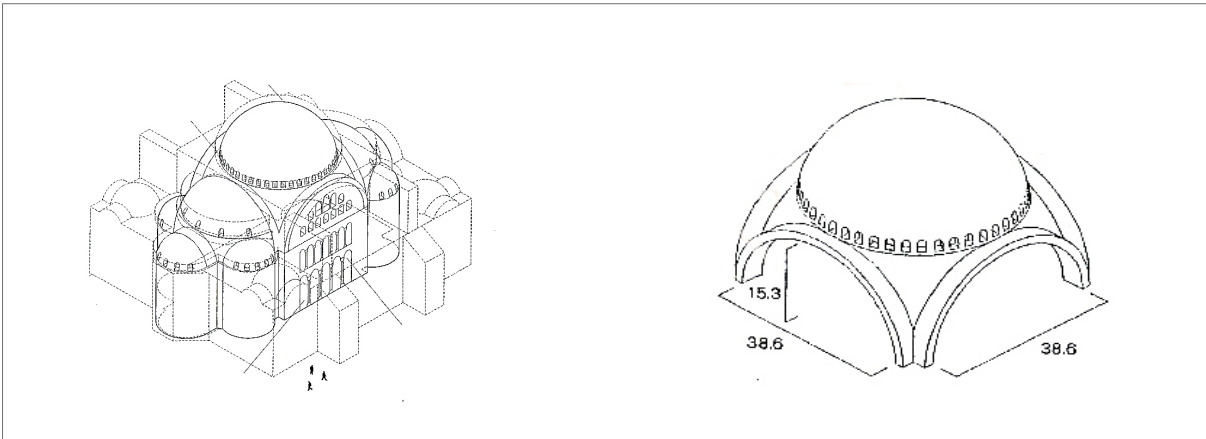
Na natureza as folhas e outros sistemas de filamentos, como as asas de insecto, são estruturas ramificadas enquanto tecidos nervurados, sinónimo de uma distribuição de forças mais equilibrada, porque são sistemas constituídos por elementos lineares curtos articulados de forma hierárquica. É um princípio de funcionamento estrutural que permite maior resistência da estrutura recorrendo ao mínimo de material, à semelhança do princípio de funcionamento estrutural da treliça. Ao sistema treliçado, Paxton conjuga na cobertura a geometria do arco, que reforçará não só o desempenho estrutural do sistema como em termos espaciais permitirá alcançar o maior volume com área mínima de superfície pelo facto de o arco derivar da forma esférica.



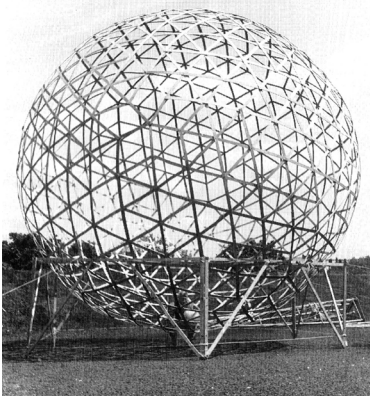
94. cenotáfio a Isaac Newton proposto por Boullée, 1784



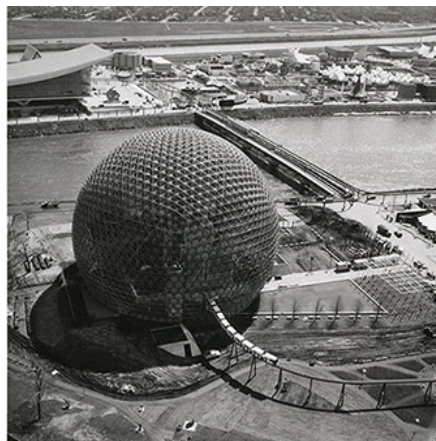
95. Basílica “Santa Sofia”, Istambul, século V.



96. Basílica “Santa Sofia”, Istambul, século V; axonometria e detalhe da cobertura, com 40 metros de diâmetro.



97. Geodome, Fuller, 1952



98. “Pavilhão dos E.U.A”, Fuller, Exposição Internacional de 1967, Canadá, 1967

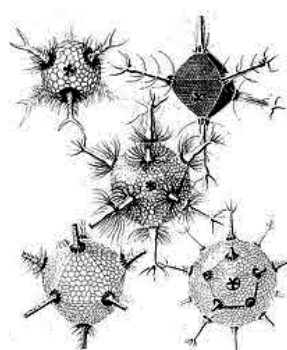
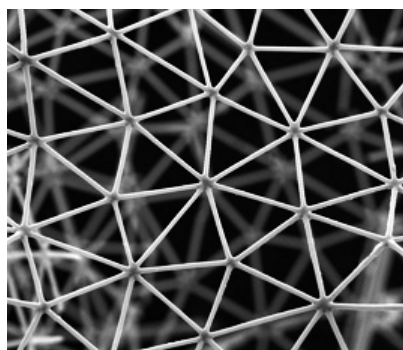
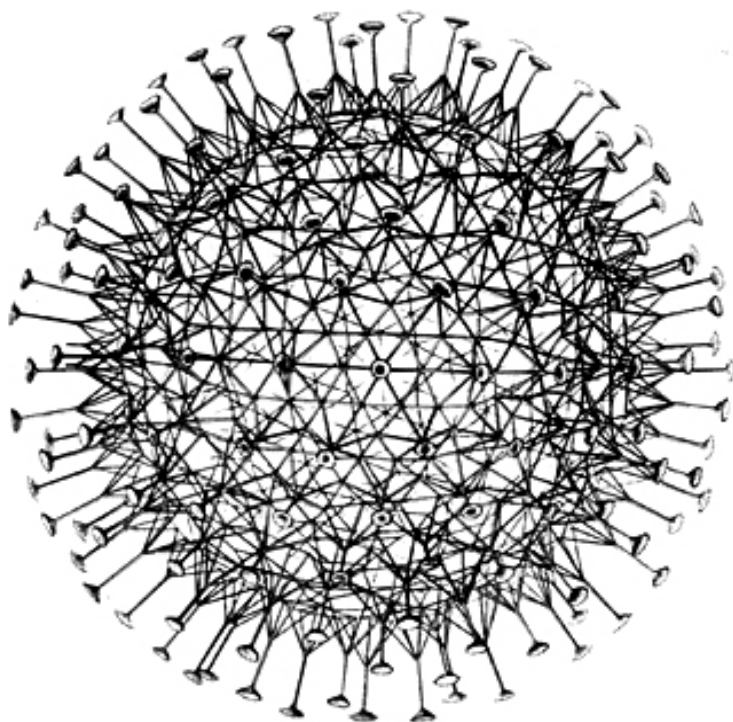
2.1.3 geodésicas de Fuller e os micro-organismos “radiolária”

Matematicamente, a esfera é a geometria de menor área que requer o mínimo de energia potencial: corresponde à melhor estratégia de conseguir o máximo volume com o mínimo de área porque enquanto superfície é a configuração que melhor se adequa na distribuição de tensões equilibradas – ou seja, uma estrutura isostática – motivo pelo qual é a base de concepção dos sistemas biológicos, que se caracterizam pela economia de recursos. A forma circular da Lua, do Sol e de outros objectos cósmicos representa geometricamente o princípio de energia mínima que regula o Universo. O mesmo se passa à micro-escala nos processos de formação da matéria, como as células. Se nos sistemas biológicos é um processo natural na nossa actividade construtiva é um processo artificial, que implica a interpretação dos princípios de funcionamento estrutural da forma esférica. No percurso cronológico da nossa actividade construtiva a procura da forma esférica tem sido pretendida – como são exemplo os projectos de Boullée, século XVIII – mas apenas conseguida sob a forma de meia esfera, ou seja, cúpulas que vão desde a escala de igloos à escala das catedrais – cujo expoente máximo é a cúpula da Igreja de Santa Sofia na Constantinopla do século V. O contributo de Fuller será decisivo no desenvolvimento do protótipo de uma estrutura esférica na íntegra, oficializando o sistema das geodésicas.

“Por volta de 1940 Fuller começa a desenvolver as primeiras geodésicas. Uma forma geodésica pode ser considerada como uma espécie de estrutura em rede tridimensional pretendida para fechar um espaço esférico. É um sistema leve que é capaz de cobrir vãos de grande dimensão pelo facto de ser construída com elementos lineares curtos.”⁶ É o motivo pelo qual as suas geodésicas se revelam contributo tão relevante para a interpretação do sistema de forças que as caracterizam: a adversidade estrutural da forma esférica está em compatibilizar os vários esforços que ocorrem na área de superfície, designadamente esforços de compressão e de flexão. Se nos sistemas porticados se compreende que a flexão ocorre predominantemente nos elementos horizontais – cobertura – e a compressão nos elementos verticais – paredes – numa configuração esférica a cobertura e paredes são um só, aspecto que dificulta a interpretação imediata do comportamento da estrutura: “é uma configuração que substitui a compressão dos elementos verticais e a flexão dos elementos horizontais através de uma superfície curva com capacidade de distribuir os esforços de forma isotrópica através do sistema estrutural.”⁷

6. Cf. R.B.Fuller, *Buckminster Fuller*, 1990, pp. 123

7. Idem, pp. 164



99. micro-organismos “radiolária”



100. detalhe do “Pavilhão dos E.U.A”, Fuller, Canadá, 1967

Com o recurso ao ferro a aproximação a uma cobertura esférica atinge o seu limite através do sistema abobadado proposto por Paxton para a cobertura do Palácio de Cristal. No entanto, deve-se a Fuller a reprodução da forma esférica total. É um aspecto técnico que supera as “semi-esferas” e alcança o que designo de “3/4 de esfera”, demonstrado no pavilhão que propõe para a Exposição Universal no Canadá em 1967 que se assume como o representante dos sistemas das geodésicas. Com aproximadamente 75m de diâmetro e 60m de altura, *“o pavilhão é constituído por módulos hexagonais piramidais repetidos de forma a produzir uma curvatura regular e encerrar um espaço esférico. Se os módulos são piramidais, a face exterior da esfera é triangular, enquanto a face interior é hexagonal.”*⁸

*“As cúpulas geodésicas tornam-se a marca registada de Fuller. Desde a sua introdução que se assumem relevantes enquanto artefacto técnico por se traduzirem na solução mais eficiente quanto à relação peso/volume; quanto ao uso de materiais em relação à área de superfície útil; quanto à relação tempo de montagem e mobilidade/deslocação.”*⁹ Estas são características fundamentais para o desenvolvimento de sistemas transportáveis, nos quais se incluem as cúpulas cinéticas do engenheiro Pérez Piñero (1960) que irei abordar no capítulo referente aos sistemas cinéticos.

Curiosamente, as geodésicas de Fuller são sistemas que convergem do ponto de vista estrutural com soluções do campo biológico, nomeadamente os micro-organismos marinhos designados *radiolária*. Os *radiolária* são estruturas lineares de configuração esférica em sílica – matéria esponjosa – cujo padrão geométrico que as constitui é de base triangular, e portanto comum ao sistema estrutural que vincula na sociedade industrial. Acrescenta-se o facto de se encontrarem espécies distribuídas por todo o planeta: *“(…) não há limitações específicas no habitar geográfico. Algumas aparecem perto dos pólos Norte e Sul, outras em correntes quentes e frias do oceano.”*¹⁰

Nos sistemas radiolária as solicitações traduzem-se na resistência à pressão da água para proteger a vida que se pretende criar. A forma esférica parece resolver o problema: porque encerra espaço e porque é resistente a nível estrutural à pressão da água. Ora, se estes organismos constituídos por matéria esponjosa se adaptam a qualquer ambiente meteorológico e sob forte pressão de água, são factos que pressupõem que não é a rigidez do material mas sim a configuração geométrica que permite a resistência, aspecto que introduz o tema da relação massa/forma no estudo de estruturas.

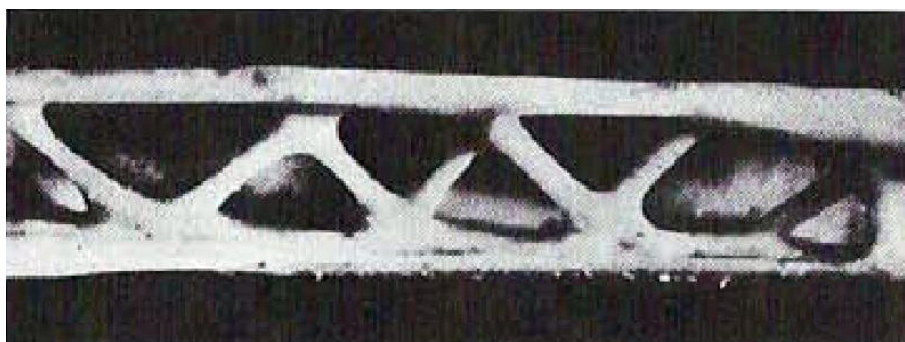
8. Gerd Hatie, *Diccionario ilustrado de la arquitectura contemporanea*, Barcelona, G.G. 1979, pp. 150

9. R B. Fuller, Joachim Krausse, and Claude Lichtenstein. *Your private sky: R. Buckminster Fuller; the art of design science*, Baden: L. Müller, 1999, pp.354

10. D'Arcy Thompson and Jonh T. Bonner, *On Growth and form*, Cambridge: Cambridge University Press, 1992, pp. 152

A relação massa/forma para se compreender a lógica física e geométrica dos sistemas biológicos tem sido objecto de estudo por biólogos e matemáticos desde a Antiguidade Clássica – como Platão que *“foi aparentemente a primeira pessoa a considerar uma descrição geométrica das formas naturais”*¹¹ – com especial incidência no século XVIII, etapa em que há maior convicção de que os princípios compositivos que regem a dinâmica e mecânica do Universo se aplicam nos elementos que constituem o planeta sendo, por isso, objectos fidedignos de uma solução estruturalmente eficiente. Deles se incluem D’Arcy Thomson e Ernest Haeckel como biólogos que estudam e categorizam micro organismos radiolária pela estabilidade estrutural do padrão triangular que origina a forma esférica; por ser uma solução que resiste a grandes oscilações de temperatura e à pressão da água.

O domínio do padrão triangular verifica-se igualmente ao longo dos exemplos publicados no livro *“On growth and form”* editado por D’Arcy Thompson, entre os quais destaco a imagem do interior de um osso da asa de ave pelo facto de corresponder ao que designo por *“sistema treliçado natural”* – uma *“rede de escoras internas nos pontos de maior tensão que substitui a medula e lhes confere a resistência pretendida.”*¹²



101. secção do osso da asa de ave

Se a natureza segue princípios compositivos baseados no mínimo de massa com a máxima resistência verifica-se que o triângulo se traduz geometricamente nesse princípio. Curiosamente, na nossa actividade construtiva chega-se à mesma conclusão pela convergência de solicitações estruturais, salientando-se o facto de que as estruturas naturais são resultado de um processo de optimização multimilenar e as nossas, artificiais, de um processo secular. Ambos os campos têm em comum o estudo da física da matéria e a respectiva investigação conclui que a resistência de uma estrutura não se relaciona com o peso e rigidez dos elementos mas com uma distribuição de esforços equilibrada, decorrente da composição geométrica que lhes está associada. É uma noção que irá conduzir ao que se designa por *“estrutura optimizada”*, que consiste na relação peso-resistência de uma estrutura.

11. Peter Pearce, *Structure in nature is a strategy for design*, Cambridge, MIT Press, 1980, pp.8

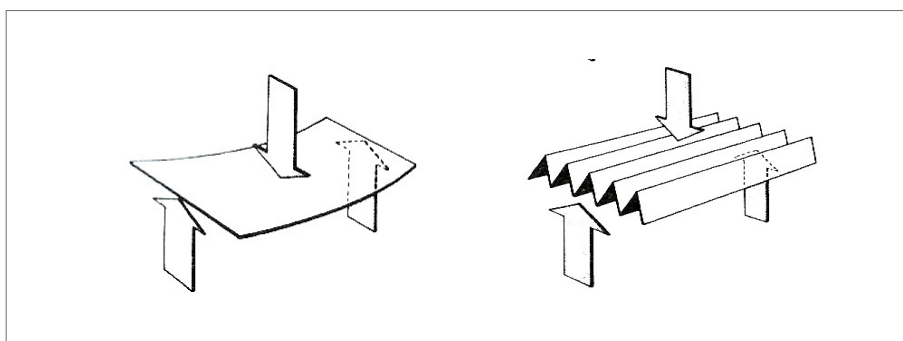
12. Cf. D’Arcy Thompson, *On Growth and Form*, Cambridge, 1992, pp. 22

No campo da nossa actividade construtiva a “máxima resistência com o mínimo material” – nas palavras de Fuller – será o tema dominante da sociedade industrializada que se alastra ao contexto da Escola Bauhaus, e que promove na década de 20 a exploração das propriedades mecânicas de materiais alternativos aos dominantes – aço, ferro, vidro – entre os quais se inclui o papel. A disciplina de Josef Albers, docente da Bauhaus em 1928, investiga relação entre forma e material e tem como objectivo reconhecer as qualidades dos materiais e a sua capacidade de alteração geométrica e física.



102. aula de Josef Albers, Escola Bauhaus, Alemanha, 1928

Estudam-se técnicas de dobragem de papel – origami – como meio de obter rigidez de um material flexível, sendo o exemplo mais ilustrativo a imagem visível na figura abaixo, que demonstra que uma superfície dobrada é mais resistente a momentos flectores. Dada a ausência de ferramentas de cálculo digital até à década de 60 a estratégia baseada na técnica origami foi um contributo que se revelou útil na optimização da actividade construtiva dominante: estruturas rígidas e estáticas entre as quais as de betão na década de 50.



103. folhas de papel.

basta uma variação na forma para alterar a sua capacidade de resistência.

2.1.4 coberturas em membrana de Frei Otto e as películas de sabão

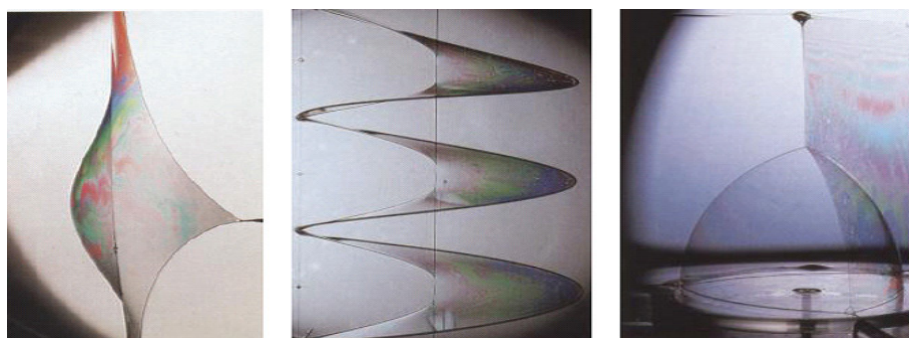
Uma estratégia alternativa à técnica origami para combater as adversidades tecnológicas é proposta na década de 50 pelo arquitecto Frei Otto, que sublinha a categoria das estruturas leves: paralelamente às estruturas referidas constituídas por peças rígidas em ferro, aço ou betão, Frei Otto impulsiona a exploração de outras técnicas construtivas para o desenvolvimento de coberturas em membrana suspensas por cabos de aço traccionado, sistemas que passam a incluir as membranas – matéria flexível – como elemento estrutural. Acrescenta-se o facto de as premissas de intervenção do arquitecto Frei Otto terem como base o estudo exclusivo de objectos da natureza quanto à sua eficácia construtiva. Assim, propôs-se interpretar a capacidade de transmissão de forças dos elementos naturais e compreender a viabilidade desse sistema de forças em estruturas construídas pelo homem. O processo de formação dos elementos da natureza será o ponto de partida para a classificação das estruturas biomiméticas na arquitectura por Frei Otto em 1964, com a fundação do Instituto de Estruturas Leves de Stuttgart. O tema converter-se-á numa das áreas fundamentais de trabalho dentro do tema geral “forma-força-massa”, onde se investigam as relações entre forma – material – capacidade de transmitir forças com a máxima economia de recursos para se chegar ao princípio da construção leve.

Numa época em que ferramentas de cálculo digital ainda não existem – até à década de 60¹³ – e considerando a dificuldade de controlar o comportamento de membranas – pela sua flexibilidade – recorre-se a modelos físicos de películas de sabão como principal ferramenta de trabalho para o desenvolvimento de estruturas de membrana traccionada. As películas de sabão “*são definidas como possuindo a superfície de maior área que requer o mínimo de energia potencial devido à sua forma. A sua principal característica estrutural é o facto de o campo de tensões que se desenvolve na sua superfície ser uniforme.*”¹⁴

13. As primeiras ferramentas de desenho digital surgem em 1963 com o projecto sketchpad desenvolvido por Ivan Sunderland no MIT.

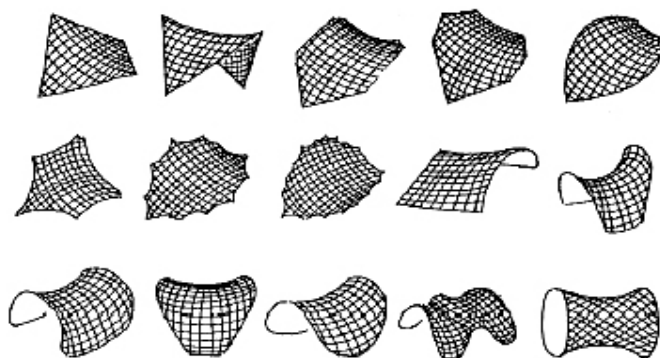
14. Pedro Gil, *Análise e dimensionamento de uma estrutura de cobertura de membrana tensa*, Porto, FEUP, 2010, pp. 81

Segundo Pedro Gil, “as bolas de sabão são sistemas com distribuição de esforços internos de tracção pura”¹⁵ e as tensões na sua superfície são uniformes. Tal como as bolas e películas de sabão, a geometria de uma membrana eficiente – ou seja, com os esforços internos equilibrados – obedece a princípios de comportamento naturais. A película de sabão adequa-se aos elementos que lhe garantem suporte, designados elementos de fronteira: “a película de sabão apenas se pode formar dentro de um sistema de elementos de fronteira cuja geometria permita a existência de tracções equilibradas entre as suas moléculas.”¹⁶ Cada sistema de condições de fronteira dá origem a uma configuração única da película de sabão, que permite explorar um número ilimitado de formas.



104. modelos de películas de sabão

O estudo sistemático deste tipo de estruturas por Frei Otto conduz a uma larga variedade de configurações de membranas, mesmo aplicadas para grandes vãos em sistemas permanentes. As coberturas de membrana com base neste princípio construtivo fazem sentido do ponto de vista técnico e económico. No entanto, “todas as formas geradas se subordinam a dois tipos: forma anticlástica – com dupla curvatura; forma sinclástica – com curvatura primária. A curvatura é necessária para assegurar estabilidade.”¹⁷

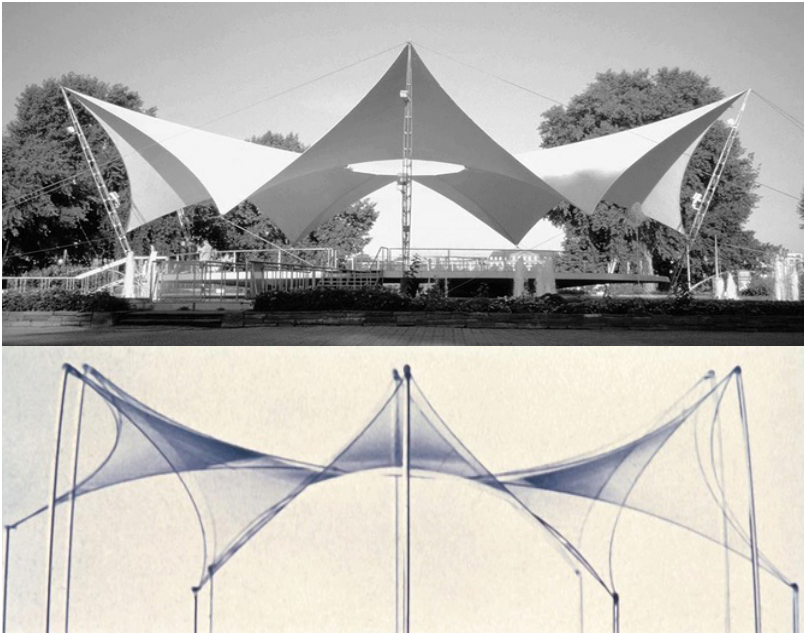


105. possibilidades de configurações de estruturas em membrana traccionada

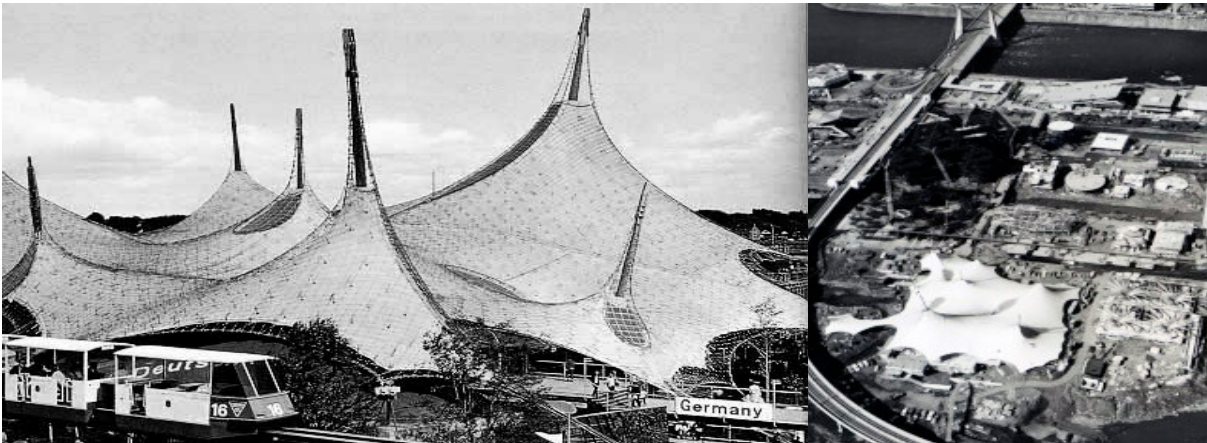
15. Pedro Gil, *Análise e dimensionamento de uma estrutura de cobertura de membrana tensa*, Porto, FEUP, 2010, pp. 81

16. Ibidem;

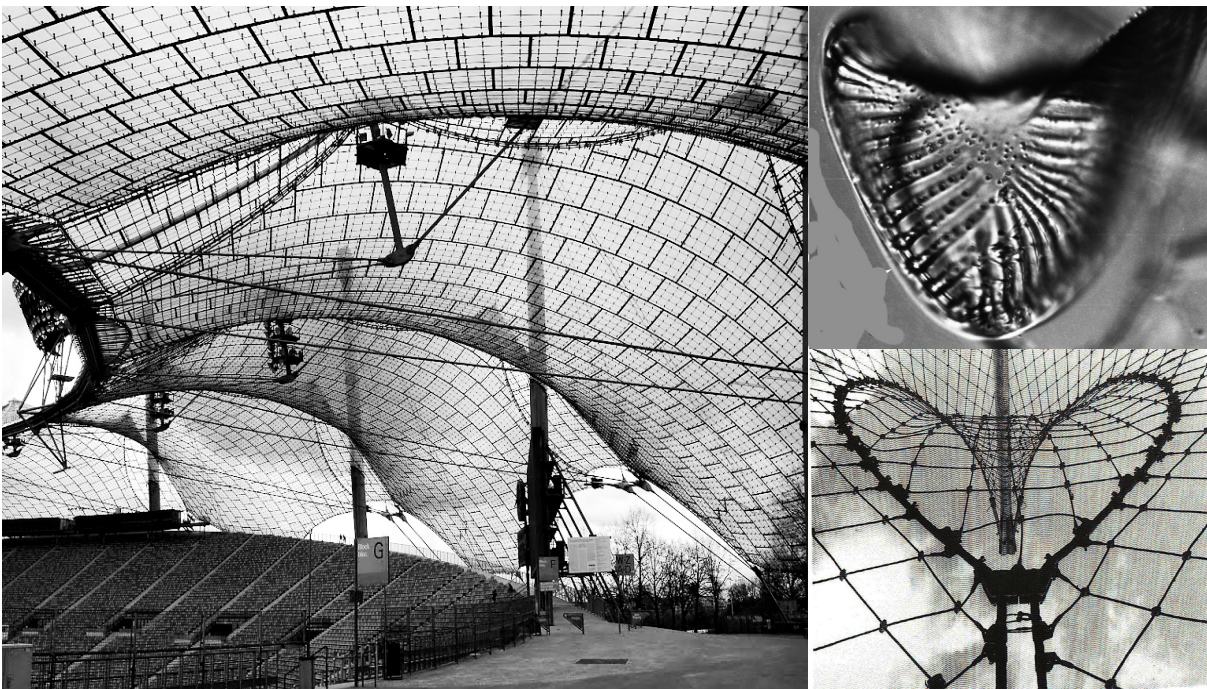
17. Frei Otto, Bodo Rasch, *Finding form: towards an architecture of the minimal*, Stuttgart, Axel Menges, 1995, pp.80



106. Pavilhão “Dance Fountain”, Frei Otto, Cologne, 1957; concepção e execução



107. Pavilhão da República Federal da Alemanha, Frei Otto, Exposição Internacional, E.U.A, 1967;



108. cobertura para Estádio Olímpico de Munique, Frei Otto, Alemanha, 1972

109. “radiolária” e detalhe da cobertura

Os primeiros modelos elaborados correspondem a estruturas simples, das quais o Pavilhão *Dance Fountain*, em Cologne, 1957 é exemplo. No entanto será a construção do Pavilhão da República Federal da Alemanha para a Exposição Internacional dos E.U.A., em 1967, a legitimar o recurso a membranas traccionadas para coberturas de grandes vãos. A estrutura respectiva incorpora uma membrana com cerca de 8000m² com cobertura sinclástica que minimiza a pressão do vento. Em 1972 a cobertura em rede de cabos para o Parque Olímpico de Munique, idealizada por Frei Otto, revela-se outro resultado de influência biomimética com inspiração em sistemas traccionados naturais como a teia de aranha e os já referidos *radiolária*, acrescentando-se a particularidade da cobertura ser a primeira estrutura da categoria da construção leve concebida com auxílio de ferramentas de desenho digital.

No que se refere a coberturas móveis de membrana o contributo de Frei Otto está precisamente na incorporação da membrana enquanto elemento estrutural traduzindo-se na redução de elementos rígidos, que implicam mais peso; acresce-se o facto de que, como está baseada em princípios de comportamento naturais corresponde a uma solução eficiente. É um avanço técnico exponencial que, tal como os sistemas de Paxton e Fuller vincaram uma charneira no percurso da história da actividade construtiva. Curiosamente os três exemplos retiram partido de princípios de comportamento naturais, motivo que reforça o recurso à biomimética como estratégia de concepção de estruturas.

2.1.5 pilar cruciforme de Mies Van der Rohe e os ossos

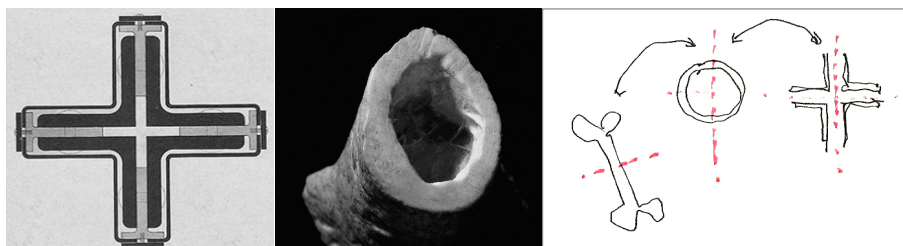
Tal como Paxton, Fuller e Frei Otto, a natureza para Mies Van der Rohe parece ter igualmente um papel relevante pela atenção que dá ao estudo de fenómenos e formas naturais, nomeadamente ao paralelismo entre ossos e perfis de aço no que se refere a princípios de distribuição de esforços, estudo que irá conduzir à solução do pilar cruciforme que explora na sua obra. Tal como Bruno Zevi refere que a abordagem à Natureza pela forma é uma estratégia primária, o texto de Mies *Living in a Jungle* insinua uma perspectiva comum pelo facto de referir que “*uma arquitectura que faça referência à Natureza deve tentar interpretar os princípios desta e compreender os seus processos, mais do que procurar a cópia directa nas suas formas.*”¹⁸

Segundo o engenheiro J. Gordon, “*a matéria que constitui a maior parte dos sistemas biológicos é flexível – fibras, pele e outro tipo de membranas citológicas – e quando é rígida é o mais leve possível como os ossos, que são ocos.*”¹⁹ A forma do osso é uma indicação directa da física estrutural, podendo ser-lhe associado a um diagrama de esforços. Ossos são simétricos na área de secção, porque são circulares. A secção circular propicia à estrutura maior resistência quando submetida a esforços, quando comparada com outras secções, como as “I” ou “H”. Isto porque a secção tem simetria radial, ou seja, é simétrica em todos os seus eixos. Tal como o osso o pilar cruciforme, desenvolvido por Mies, é baseado no mesmo princípio de simetria radial: é constituído por quatro peças em “L” fixas entre si – e é simétrico na área de secção em todos os eixos de simetria possíveis, contrariamente às soluções de perfis dominantes com secção em “H” ou “I” que não são simétricas em todos os seus eixos.

110. pilar cruciforme, Mies Van der Rohe

111. secção de um osso

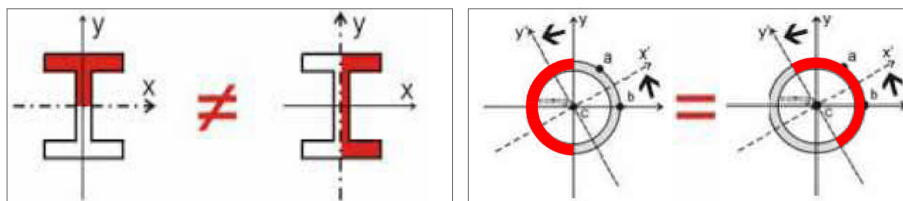
112. princípio de concepção do pilar cruciforme



113. perfis: secção “I” e “O”

a secção “I” possui diferenças geométricas em cada eixo;

a secção “O”, tal como a secção do perfil cruciforme, é simétrica em todos os seus eixos, o que significa que todas as tensões terão as mesmas distâncias para percorrer, evitando, assim, assimetrias que potenciem a flexão da peça.



18. Ludwig Rohe, Phyllis Lambert, and Werner Oechslin. *Mies in America*. Montréal Nova Iorque: Canadian Centre for Architecture Whitney Museum of American Art Harry N. Abrams, Publishers, 2001, pp. 611

19. J. E. Gordon, *The science of structures and materials*. Nova Iorque: Scientific American Library Distributed by Freeman, 1988. pp. 175

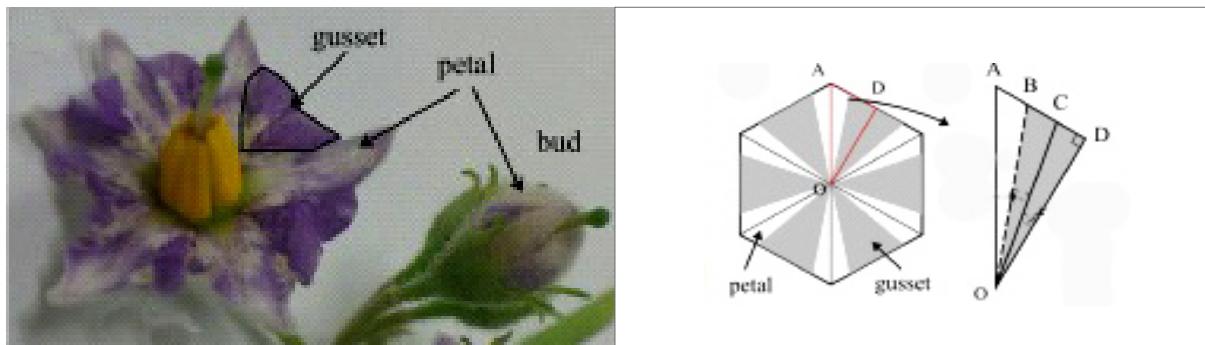
2.2 a biomimética como busca de sistemas cinéticos

A cinética como mecanismo de movimento nos organismos vivos relaciona-se com a sua adaptação ao meio envolvente, condição fundamental à sobrevivência e resultado de uma evolução multimilenar, o que significa que as estruturas que constituem os organismos vivos correspondem à solução mais eficiente. Acrescenta-se o facto resultarem de processos de formação baseados em princípios de energia mínima, que conduz à massa mínima - sinónimo de soluções baseadas na economia de recursos. Sintetizando, os sistemas biológicos tendem a ser estruturas leves e resistentes, características comuns às pretendidas para as coberturas rígidas adaptáveis que me propus estudar. No campo da arquitectura, as estruturas desta categoria de influência biomimética reportam ao sistema construtivo e incorporam mecanismos de variação formal, inspirados em princípios de funcionamento de sistemas biológicos. Apesar de, no campo da arquitectura, haver soluções que convergem do ponto de vista técnico com as soluções biológicas, os exemplos seleccionados correspondem a soluções com influência directa em sistemas biológicos referidas pelos próprios arquitectos.

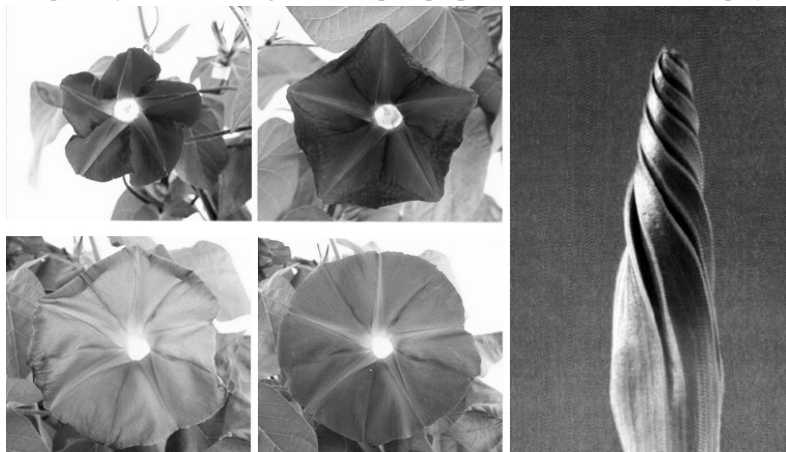
Este subcapítulo refere os sistemas vegetais e animais, cujos mecanismos inspiram o desenvolvimento tecnológico de soluções no campo da arquitectura, a par de alguns exemplos de projectos de investigação no campo da bioengenharia. No campo da arquitectura, no que se refere a sistemas biomiméticos que incluam características de variação, as premissas de intervenção do arquitecto consideram a categoria da sustentabilidade energética – ao apontar soluções que resolvam ou atenuem problemas, como regular a temperatura e/ou otimizar a luz num espaço – e a da sustentabilidade ambiental, ao permitir a reutilização de uma estrutura. No campo da bioengenharia, o recurso à biomimética como processo de características de variação é justificado pela necessidade de soluções para aplicação em equipamentos lunares, o que significa que se retira das características de variação as possibilidades de conversão formal, particularmente a relação entre a área de superfície de um objecto em estado recolhido e expandido.



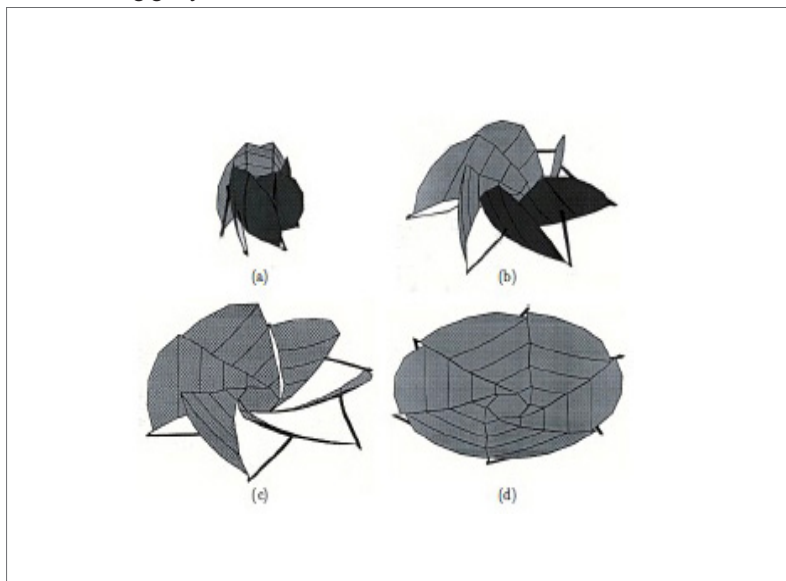
114. *Vila Girasole*, Angelo Invernizzi e Ettore Fagioli, 1929



115. *potato flower*; análise geométrica para proposta *Potato Flower as a deployable structure*, Universidade Osaka, Japão



116. "morning glory".



117. *Solid surface deployable antenna*, Universidade de Osaka, Japão.

"Cada painel é articulado ao eixo central através de uma rótula que permite a rotação em torno de dois eixos e a consequente sobreposição dos painéis através de varetas com juntas esféricas. Entre as posições de estado recolhido para expandido cada painel desloca e roda simultaneamente na direcção do eixo central."¹

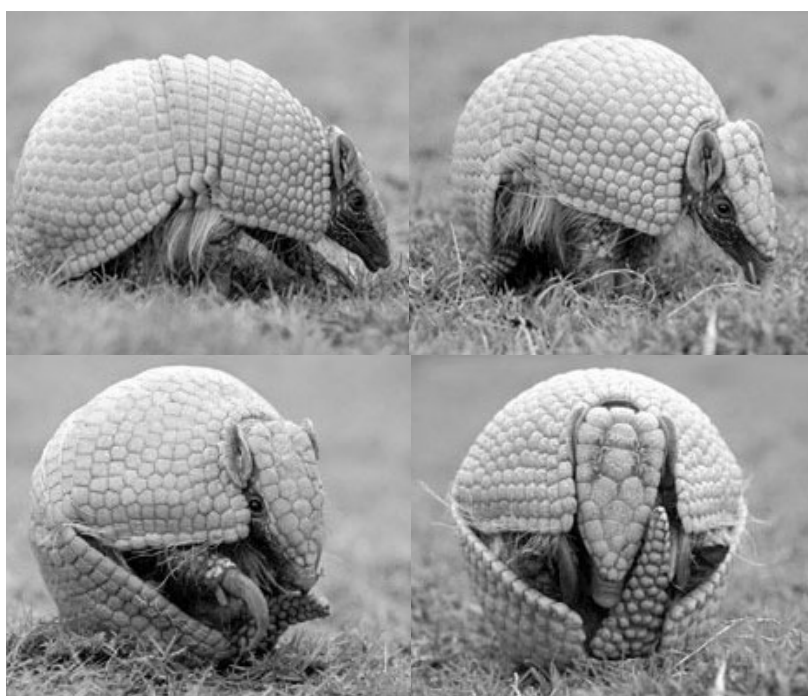
1. Gunnar Tibert, *Deployable tensegrity structures for space applications*, Estocolmo, KTH, 2002, pp.27

2.2.1 sistemas vegetais

Nos sistemas vegetais o movimento acciona-se por estímulos externos, entre os quais se incluem os natismos. Esta designação refere-se ao crescimento com direcção que varia de acordo com a intensidade dos agentes climáticos – como por exemplo a temperatura, visível nos girassóis, cuja posição se adequa à estratégia mais favorecida de captação de luz solar, ou visível nas *potato flower* e nas pétalas da flor *morning glory*, que abrem e fecham de acordo com a temperatura. O bloco habitacional *Villa Girasole*, dos arquitectos Angelo Invernizzi e Ettore Fagioli, 1929, é uma solução que pretende tirar partido da luz solar através de uma casa com princípios de funcionamento inspirados no movimento de um girassol. É um edifício em “L” que assenta e se desloca inscrito numa plataforma circular – um pátio.

A *potato flower* e a *morning glory* assumem especial interesse do ponto de vista geométrico pela relação que estabelecem entre a área de superfície em estado recolhido e expandido decorrente da estratégia de dobragem. Este aspecto é particularmente interessante se transposto para coberturas cinéticas móveis justificado pelo pouco espaço que ocupam relativamente à área de extensão que proporcionam. No entanto, até à data, não se verificam soluções com o propósito de cobrir grandes vãos e baseadas neste princípio, mas sim propostas de pequenas dimensões – portáteis – para equipamento espacial, como parabólicas para telecomunicações ou antenas de satélites, como são exemplo os projectos de investigação *Solid Surface Deployable Antenna* e *Potato Flower as a Deployable Structure*, ambos propostos pelo departamento de bioengenharia na Universidade de Osaka no Japão. A proposta *Potato Flower as a Deployable Structure* está em estado de investigação e desconhece-se um protótipo executado para equipamento. Com a observação da flor verifica-se que “entre cada pétala existem reforços de configuração triangular que se dobram e que juntos – os reforços e as pétalas – configuram uma superfície quase plana quando a flor está completamente aberta, com a configuração de um hexágono.”¹ Seria interessante a transposição deste tipo de solução para o campo da arquitectura na concepção de coberturas que se pretendem com as características geométricas e mecânicas mencionadas. Na proposta *Solid Surface Deployable Antenna* o mecanismo de movimento dos painéis é semelhante ao das pétalas da flor *morning glory* – que se enrolam em espiral num broto fusiforme – e a articulação entre eles é com recurso a juntas esféricas. Os painéis em estado recolhido estão sobrepostos em torno do eixo central que os suporta – princípio semelhante às pétalas da *morning flower*. O protótipo desenvolvido corresponde a uma estrutura que em estado recolhido tem a forma de um cilindro – com 0.50m de diâmetro com 0.80m de altura – que quando em estado expandido tem uma área de superfície de 10 m.

1. PELLEGRINO, Sergio, Unfolding of a potato flower as a deployable structure, *Deployable Structures and Bio Morphology*, Nova Iorque, E.U.A., 28-31 Maio, 2008, pp. 1



118. “tatu-bola”, vertebrado



119. “bicho-de-conta”, invertebrado

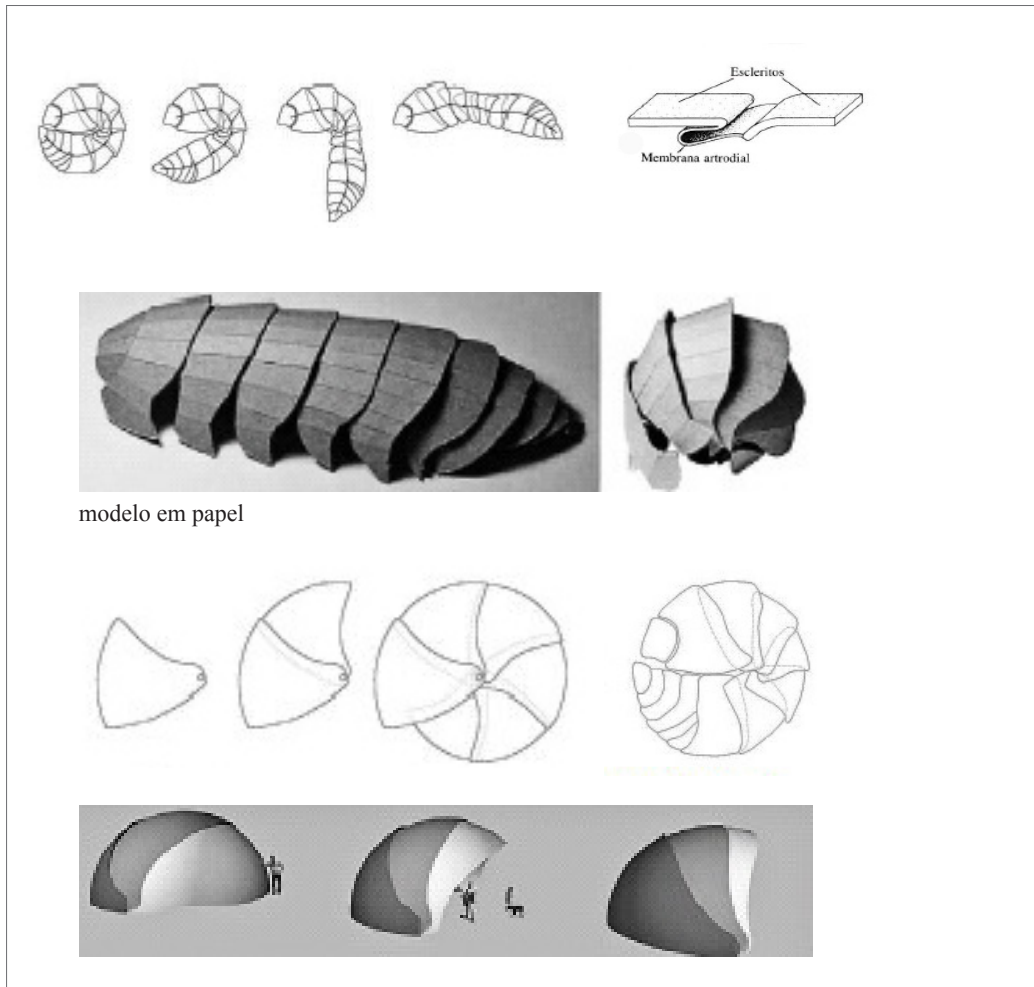
São propostas que tiram partido dos padrões geométricos decorrentes do movimento das plantas, princípio útil para transpor para o campo da arquitectura. No entanto, a estratégia de concepção destes equipamentos não se subordina apenas à influência biomimética mas também à combinação de técnicas de dobragem de papel – origami, não só pela questão geométrica mas também pelo propósito de obter rigidez de um material flexível e com isso a redução no peso da estrutura, que é evidentemente um critério fundamental para requisitos de mobilidade.

2.2.2 sistemas animais

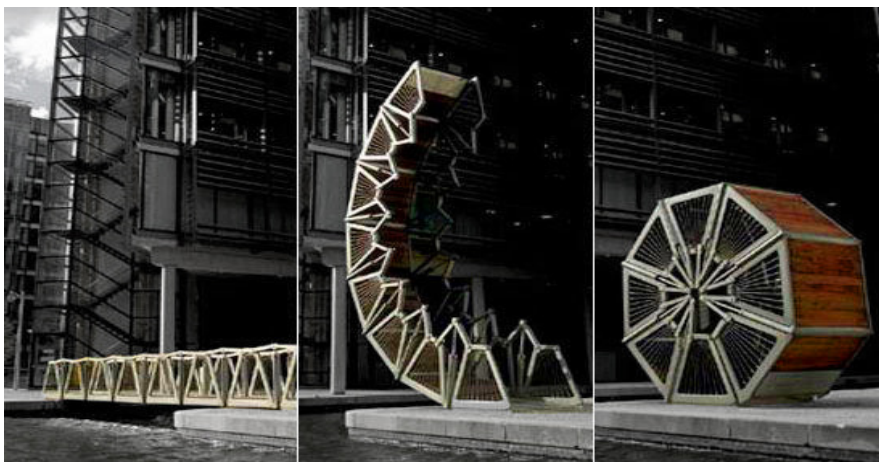
Nos sistemas animais o movimento é decorrente da actividade interna do organismo, como a contracção ou extensão de músculos induzidos pelo sistema nervoso. Acrescenta-se o facto de que são estruturas mais complexas do que as vegetais, porque subordinadas a outro tipo de solicitações externas como requisitos de locomoção, como nadar, correr, saltar ou voar. Estas acções pressupõem condições de leveza e flexibilidade para melhor desempenho do sistema, e, por esses motivos, insinuam-se como estruturas mais requintadas do ponto de vista técnico.

Encontram-se exemplos no grupo dos vertebrados – como o “tatu-bola”, a asa de morcego e a asa da ave – e no grupo dos invertebrados – como o “bicho de conta”, asas de insectos como o besouro e a “joaninha”, e patas de crustáceos como o caranguejo. São exemplos de animais que selecciono pelo facto de uns serem pertinentes para investigação, e outros estarem já incluídos no processo de concepção das propostas de arquitectos que irei referir de seguida

O bicho-de-conta – designação comum para os glomerídeos da classe dos artrópodes – e o tatu-bola – designação comum para os tricinctus da classe dos mamíferos – são exemplos de animais com dimensões distintas – o bicho-de-conta com 2cm, o tatu-bola com 30cm – e que pertencem a grupos distintos mas têm em comum a capacidade de enrolar o corpo em forma de esfera como estratégia de defesa, pelo facto de ambos serem revestidos por superfícies rígidas dorsais curvas que funcionam como protecção: carapaças segmentadas.



120. bicho de conta: análise geométrica e proposta biomimética;



121. Rolling bridge, Thomas Heatherwick, Londres, 2004

São vários os interesses destes sistemas do ponto de vista estrutural: a convexidade da superfície das carapaças associada à estratégia como se intersectam quando submetidas a movimento de locomoção e de rotação, e o facto de a forma da estrutura global se traduzir na esfera. São aspectos a considerar para coberturas que se pretendam com estas características, alternativas às constituídas por elementos lineares. Porém, a adversidade das carapaças quando transposta para coberturas cinéticas está precisamente na estabilidade da estrutura e nas suas articulações: se nos sistemas biológicos a estabilidade é pelo miolo interno – quer por compressão de fluidos no caso do invertebrado, quer pelo esqueleto e compressão das fibras no vertebrado – no âmbito da arquitectura o interesse está no esvaziamento da área para possibilidade de cobertura e portanto requer uma solução alternativa quanto a questões de estabilidade. Se nos invertebrados as superfícies se articulam através de fibras elásticas e flexíveis, no âmbito da arquitectura as articulações correspondem a juntas esféricas enquanto solução de rótula e recurso a cabos traccionados para garantir estabilidade geral da estrutura.

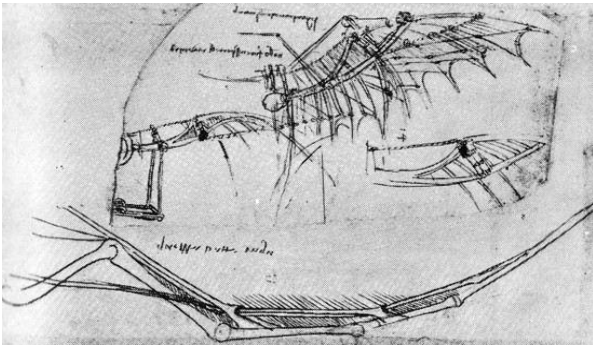
Uma solução explorada com base nesses pressupostos é o protótipo para uma cobertura desenvolvido na Universidade de Viena em 2005 sob a docência de Katharina Fuchs. O protótipo tem duas soluções baseadas no corpo segmentado do bicho-de-conta, sendo desenvolvida a solução correspondente a uma cúpula: *“dois dos segmentos constituintes da estrutura rodam juntos, nos quais o mais pequeno desliza sob o de maior dimensão, assegurado pela geometria particular das extremidades”*² Segundo a autora *“é uma estrutura de geometria simples que pode ser aplicada para coberturas ou outro tipo de equipamento com solicitações de protecção, onde critérios como o movimento ou a extensão de espaço são características particulares desta solução.”*³

Desconhecem-se intervenções dominantes desta categoria no âmbito da arquitectura. No entanto o recurso à biomimética do bicho-de-conta e tatu-bola verifica-se mais válido quando se tira partido do mecanismo de movimento de rotação, como é exemplo a ponte pedonal Rolling bridge em Londres, 2004.

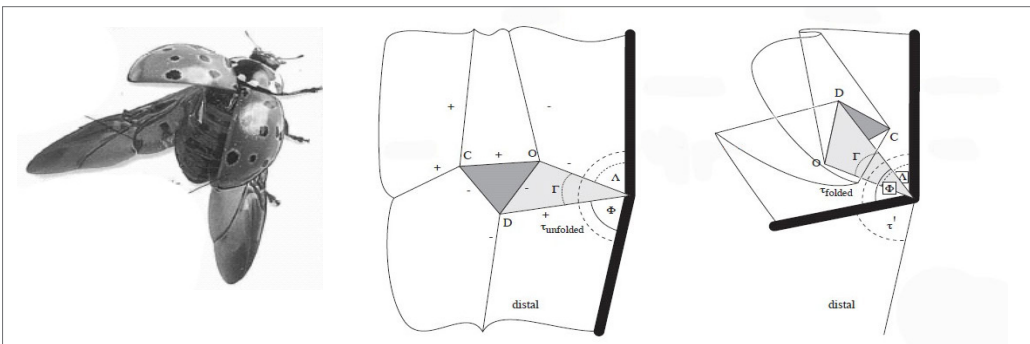
É uma estrutura linear em aço, que vence um vão de 13m e que se expande e recolhe através de um sistema hidráulico. Tanto o protótipo para uma cobertura como a proposta para uma ponte são soluções distintas com influência no mesmo objecto, o que demonstra que a interpretação de um sistema biológico não se restringe a uma função ou mecanismos específicos. O mesmo se constata em estruturas com influência em asas, que tanto tiram partido da composição geométrica da membrana como da mecânica de articulação dos elementos que a constituem.

2. Petra Gruber, *Biomimetics in architecture architecture of life and buildings*. Viena Nova Iorque: Springer, 2011, pp. 256

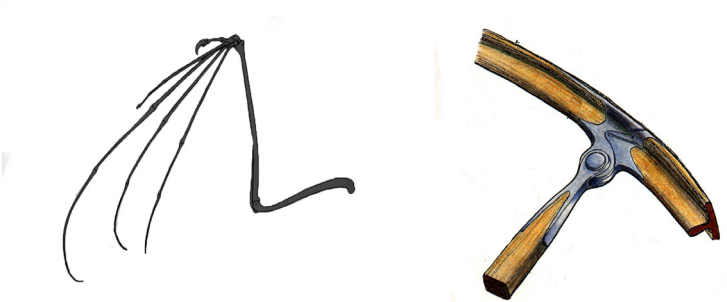
3. Ibidem;



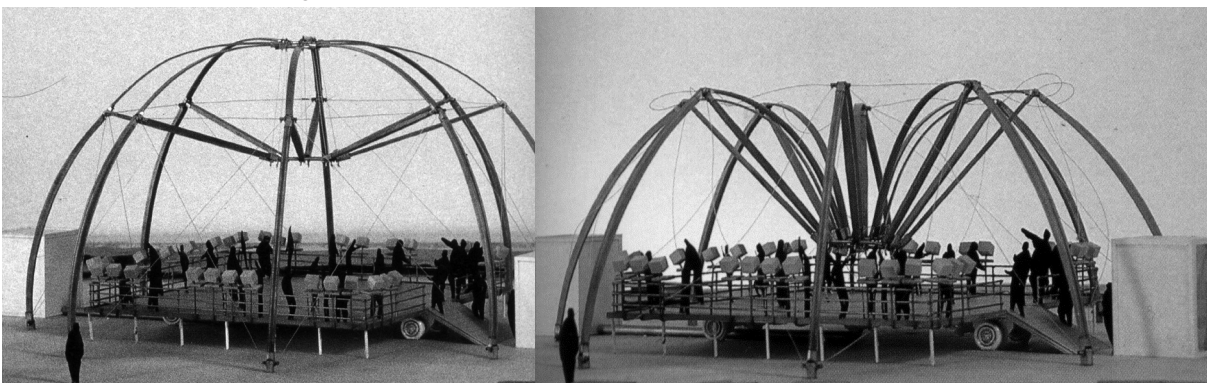
122. asa de vertebrado, estudos de Leonardo Da Vinci



123. “joaninha” e análise geométrica da asa, detalhe



124. vertebrados: asa de morcego e asa de ave



125. maquete de cúpula para exposições, Renzo Piano.

Animais voadores como insectos, aves ou o morcego são sistemas ainda mais requintados do que os anteriormente referidos, devido à sua mobilidade aérea implicar o mínimo peso da estrutura portante, e, por isso, animais de especial interesse enquanto objectos estruturais para o estudo de coberturas cinéticas. Mais especificamente, o estudo das asas para coberturas cinéticas em membrana pelo pouco espaço que ocupam quando recolhidas relativamente à área de extensão que proporcionam quando em voo, características que apelam e justificam o estudo dos mecanismos constituintes de cada tipo de asa. O estudo de asas de vertebrados remonta ao século XV com os estudos de Leonardo Da Vinci. Tal como a asa da ave, a asa de insecto constitui um tipo de mecanismo de movimento interessante por sintetizar as características acima referidas. Os insectos têm dois pares de asas sobrepostos com forma e dimensão distintos: as exteriores são cascas que protegem as interiores, que são membranas nervuradas. *“Quase todos os insectos voadores têm a capacidade de dobrar as asas a 180°, característica que lhes permite entrar em espaços apertados como fendas quando não estão a voar.”*⁴ Do ponto de vista técnico a mecânica correspondente ao processo de extensão e recolha da asa tem sido alvo de estudo no âmbito da biotecnologia, como é exemplo a investigação *Geometry and mechanics of hind-wing folding in Dermaptera and Coleoptera* que considera o estudo da asa de besouro e que se revela um contributo para possíveis aplicações em coberturas cinéticas.

Contudo, desconhecem-se soluções no âmbito da arquitectura que contemplem este princípio de funcionamento. As que existem tiram partido da mecânica de articulação das asas de vertebrados, tal como a cúpula de Renzo Piano para exposições itinerantes baseada em mecanismos de movimento de asas de vertebrados. A cúpula é constituída por oito elementos lineares articulados dispostos radialmente em torno de um aro circular e varia em altura através das rótulas que constituem cada elemento. Estuda uma peça de articulação em alumínio e madeira. Mesmo sendo uma proposta que ficou pela maquete verifica-se que para a cúpula ser estável necessita de tirantes de aço em cruz suportados entre cada peça rígida.

Actualmente intensifica-se a urgência em soluções sustentáveis, o que reforça e justifica o recurso à biomimética como ferramenta útil ao arquitecto, acrescentando-se a preocupação na procura de soluções que resolvam ou melhorem questões energéticas, gestão de recursos e resíduos e “pegada ecológica”, ou seja, o solo o máximo permeável. Critérios que fazem parte dos cardápios actuais da legislação e regulamento no sentido do apelo ao equilíbrio com o meio ambiente. Para além da actividade construtiva ter em consideração requisitos relacionados com o meio ambiente, as solicitações práticas que vinculam relacionam-se fundamentalmente com mobilidade e versatilidade, já introduzidas pelo ritmo da industrialização.

4. J. E. Gordon, *The science of structures and materials*. Nova Iorque: Scientific American Library Distributed by Freeman, 1988. pp. 178

Acentua-se a necessidade de explorar novas propostas, novos métodos e ferramentas de trabalho para dar resposta rápida às solicitações impostas pelo contexto actual da sociedade contemporânea, em que a tecnologia cada vez mais especializada, para além de ser um facto adquirido como parte integrante desta realidade se revela ferramenta indispensável ao arquitecto quer para concepção do projecto, quer para actuar como meio operativo no sistema do edifício.

Considero pertinente o recurso à biomimética para projectar estruturas cinéticas móveis:

1. pelo estado actual das questões ambientais;
2. por soluções da natureza corresponderem a recursos optimizados;
3. pela tecnologia digital possibilitar interpretação desses recursos via cálculo;
4. pelo facto de a aproximação do ser humano à natureza enquanto procura de soluções ser transversal ao longo do tempo;

capítulo 3. casos de estudo

Como referido no subcapítulo “1.1.2. cinética”, as coberturas rígidas expansíveis são um tipo particular do grupo das estruturas cinéticas. São estruturas articuladas que podem alcançar diferentes configurações desde completamente recolhidas – onde todos os elementos estruturais estão concentrados num grupo – até ao estado de expansão, cobrindo uma área de superfície significativa. São sistemas que recolhem e expandem e que, por esse motivo, permitem não só estados intermédios entre as correspondentes posições limite como também em termos logísticos uma possibilidade de armazenamento mais optimizada, sendo por isso sistemas pertinentes para incorporar em coberturas transportáveis. Algumas “são constituídas por dispositivos mecânicos adequados a corrigi-las nas posições desejadas. O processo de expansão da estrutura pode ser mais ou menos complexo dependendo do trabalho e da especialização, e da quantidade de meios auxiliares necessários.”¹ Dentro das estruturas rígidas expansíveis pode-se considerar dois grupos principais:

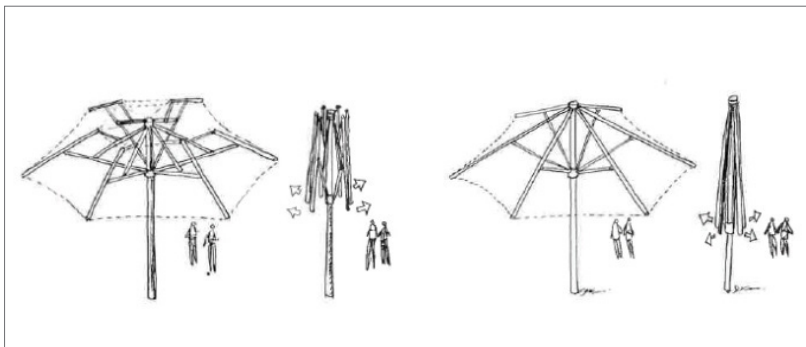
1. as constituídas por sistemas pantógrafos – desenvolvidas por Emílio Pérez Piñero, Félix Escrig e Chuck Hoberman
2. as constituídas por sistemas “guarda-chuva” – desenvolvidas por Buckminster Fuller e Frei Otto.

Neste capítulo apresenta-se este tipo de estruturas, para aplicação no campo da arquitectura, recorrendo ao trabalho dos referidos arquitectos. Explicam-se as características de cada elemento para se compreender o sistema, e a condição que cada estrutura tem que cumprir para garantir a capacidade de recolha e expansão de forma, assim como da estabilidade e rigidez da cobertura. São abordados especificamente as diferentes unidades modulares dentro de cada grupo de guarda-chuva e pantógrafos. A tabela seguinte resume os objectos de estudo deste capítulo:

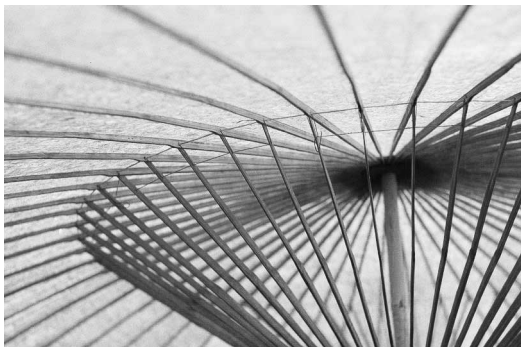
sistema construtivo	arquitecto	obra local	ano
tipo "guarda-chuva"	Buckminster Fuller	<i>Flying Seedpod</i> , Universidade de Washington	1953
	Frei Otto	<i>Umbrellas for the Federal Horticulture Show</i> , Cologne	1971
		<i>Umbrellas for the Courts of the Prophet's Holy Mosque</i> , Medina	1992
		<i>Umbrellas for the Schlossplatz</i> , Jena	2004
tipo "pantógrafo"	Emílio Pérez Piñero	<i>Teatro Ambulante para 500 Espectadores</i> , Madrid	1961
		<i>Pabellon Transportable para Exposiciones</i> , Madrid e Barcelona	1964
		<i>Cúpula Desplegable para Grandes Luces</i> , Madrid	1966
	Félix Escrig	<i>Cubierta Desplegable de la Piscina San Pablo de Sevilla</i> , Sevilla	1996
		<i>Cubierta Desplegable para Estadio Innsbruck</i> , Innsbruck	1999
	Chuck Hobermann	<i>Expanding Geodesic Dome</i> , New Jersey	1991
		<i>Iris Dome</i> , Nova Iorque	1994
		<i>Iris Dome</i> , Hannover	2000

127. coberturas rígidas transformáveis: sistemas tipo guarda-chuva e tipo pantógrafo

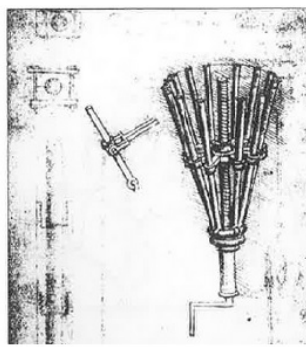
1. Félix Escrig, Geometry of expandable space structures, *International Journal of space bar structures*, vol.8 n. 1/2, 1993, pp. 71



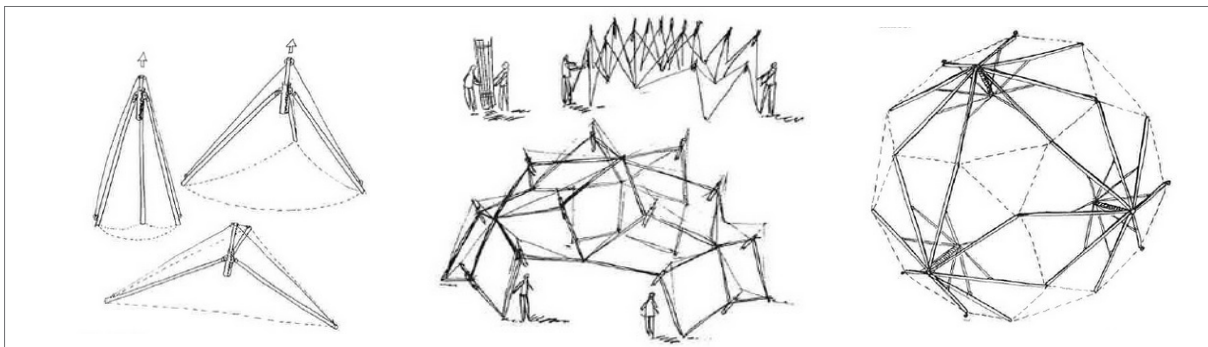
128. guarda-chuva, tipos de sistema



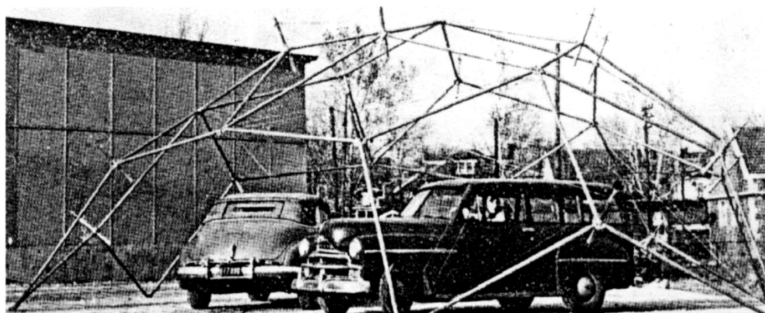
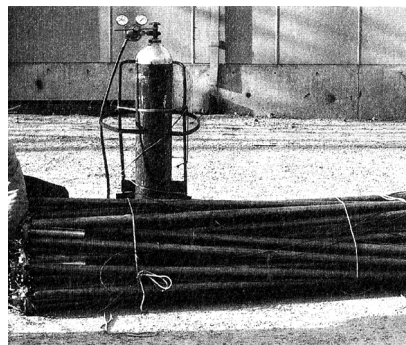
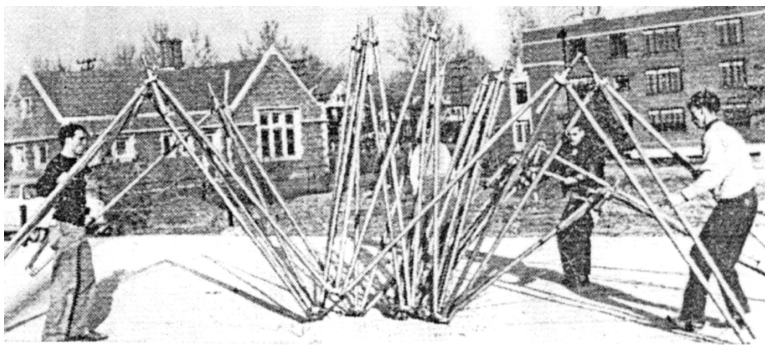
129. guarda-chuva japonês



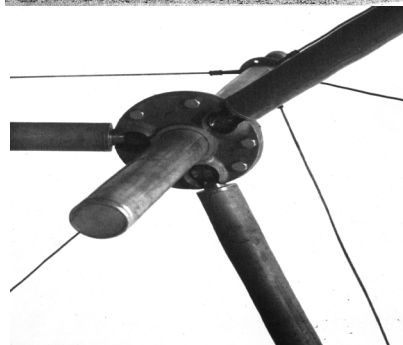
130. estudos de Leonardo Da Vinci



131. *Flying Seedpod*, Fuller, 1953; módulo da estrutura e possibilidades geométricas



132. *Flying Seedpod*, Fuller, 1953;



3.1 sistemas tipo guarda-chuva

O sistema guarda-chuva consiste num mastro à volta do qual se dispõe radialmente um conjunto de peças que se recolhem sobre o mesmo. Essas peças podem, segundo Félix Escrig, ser rígidas ou articuladas. As rígidas remontam à construção tradicional japonesa e a registos de Leonardo Da Vinci no Código de Madrid II. Estes sistemas – já bem conhecidos em pequenas dimensões para protecção do Sol ou da chuva – foram objecto de protótipos por parte de Fuller e de interessantes propostas à escala urbana por parte de Frei Otto enquanto solução de complemento a equipamentos e espaços públicos.

3.1.1 Buckminster Fuller

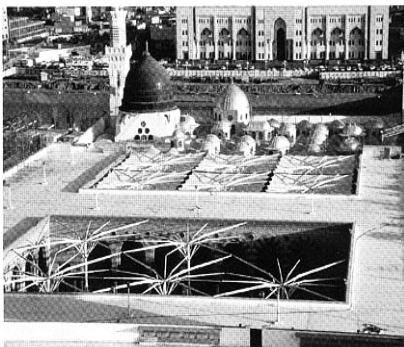
Os “guarda-chuva” de peças rígidas são sistemas explorados por Fuller com o protótipo *Flying Seedpod* que executa em 1953 na Universidade de Washington. Este conceito tira partido dos respectivos mecanismos e fá-los corresponder ao módulo base que desenvolve a partir de três peças rígidas e, multiplicado e combinado, possibilita configurações poliédricas.

O protótipo que executa consiste numa estrutura com um diâmetro de 10 metros, constituída por 15 módulos de três peças articuladas através de um mastro pequeno no topo de cada módulo. O mastro é empurrado para fora automaticamente através da força motriz de ar comprimido: o mastro corresponde a um pistão - peça que se move num corpo cilíndrico por pressão de um fluido, neste caso gás. Cada pistão tem três elementos à tracção - tirantes de aço - ligados às respectivas bases do tripé. Como são expandidos através de uma pressão de gás elevada os elementos à tracção puxam as bases do tripé para fora num sistema de forças “acção-reacção”. Citando Fuller, “*a estrutura é complementada por uma rede de cabos numa configuração de “estrela regular geodésica”, rede esférica que restringe o movimento dos apoios da estrutura, aumentando a estabilidade do sistema geral.*”² Todos os membros estruturais são firmemente agrupados em paralelo com o objectivo de a estrutura ser transportada ocupando o mínimo de volume dentro de uma cápsula rígida. No entanto, no seu conjunto revela-se uma estrutura instável. Fuller tira partido de mecanismos “guarda-chuva” para aplicação em cúpulas.

2. R B Fuller, Joachim Krausse, and Claude Lichtenstein. Your private sky : R. Buckminster Fuller, the art of design science. Baden: L. Müller, 1999, pp. 342



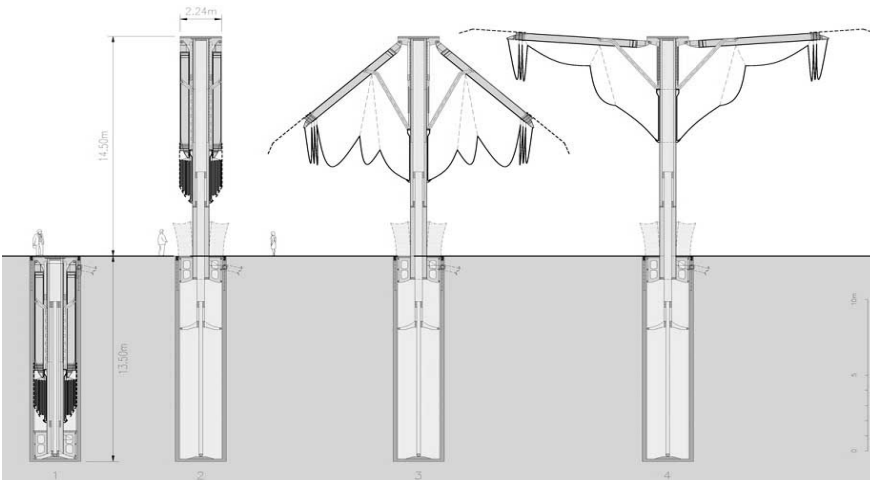
133. *Umbrellas for the Federal Horticulture Show*, Frei Otto, Cologne 1971; parque de estacionamento e plateia para espectáculo



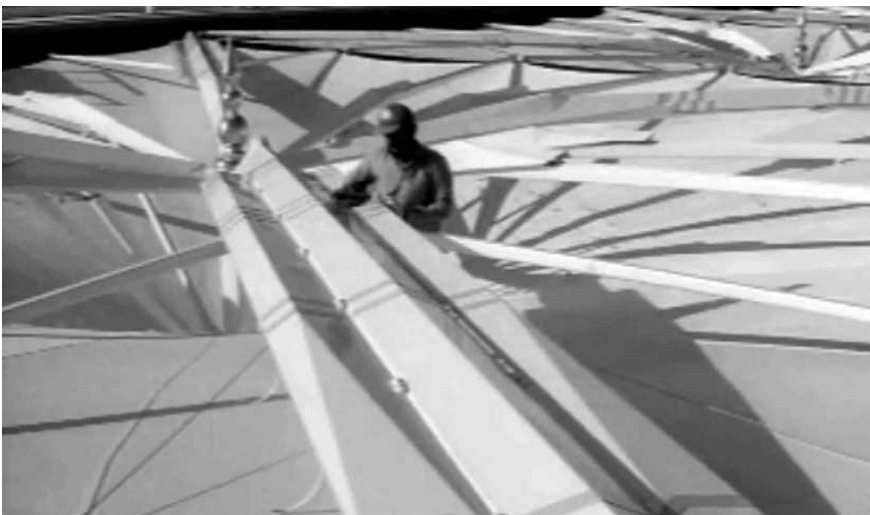
134. *Large Umbrellas for the Courts of Prophet's Holy Mosque*, Arábia Saudita, 1992;



135. detalhe da cobertura, painéis FV.



136. *Umbrellas for the Schlossplatz*, Jena, Alemanha, 2004



137. *Umbrellas for the Schlossplatz*, Jena, Alemanha, 2004, detalhe da cobertura

3.1.2 Frei Otto

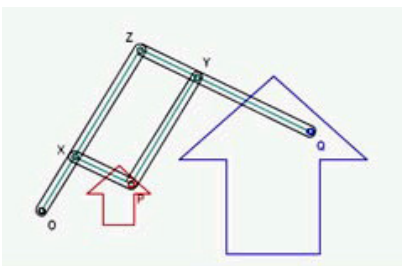
Para Frei Otto a tipologia de “guarda-chuva” enquanto estrutura vertical com um ponto de ancoragem no solo, “*em geral não proporciona vãos de grande dimensão porque está em consola*”³. Nesse sentido Frei Otto deu especial contributo no desenvolvimento de estruturas desta tipologia, pelas propostas que desenvolve à escala urbana.

A cobertura *Umbrellas for the Federal Horticulture Show*, Cologne, 1971, corresponde à primeira aplicação desta tipologia com 19m de diâmetro que passa de estado recolhido para expandido em cerca de dois minutos, mas é na proposta *Large Umbrellas for the Courts of the Prophet's Holy Mosque*, em Medina, Arábia Saudita, 1992, para intervenção nos pátios interiores do edifício, que este sistema evolui não só em dimensão como em tecnologia: cada “guarda-chuva” tem configuração quadrangular com vão de 24m, dimensão possibilitada pela estrutura ramificada complementar incorporada em cada peça rígida que tracciona a membrana, acrescentando-se a particularidade de que cada peça funciona através de um sistema hidráulico situado no mastro central e tem incorporada “*painéis fotovoltaicos que permitem abrir e recolher a membrana sem o recurso a energia eléctrica*.”⁴ O mastro central – com 14m altura – é oco para escoamento de águas, características que no conjunto contemplam critérios de sustentabilidade energética. Foram implantadas doze unidades por cada pátio interior da mesquita que tem cerca de 2000m² de área de superfície. Para além dos dois exemplos referidos este tipo de soluções adquire domínios de aplicação alargados como complemento a praças, esplanadas ou outros equipamentos religiosos.

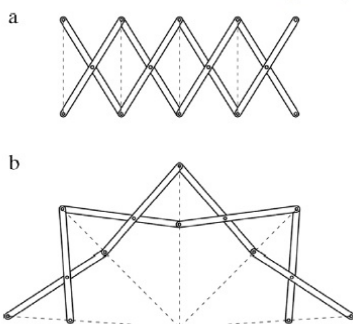
Em 2004 Frei Otto aplica, com a proposta *Umbrellas for the Schlossplatz*, em Jena, Alemanha, o expoente máximo deste tipo de sistemas não só em dimensão como também em tecnologia: cada estrutura vence um vão de 46m em estado aberto e recolhe-se para um diâmetro de 2.5m; é a primeira aplicação de sistema pensado para armazenamento subterrâneo, com comprimento de 14m correspondente à altura de cada estrutura. Foi uma solução desenvolvida para uma praça que geralmente atinge a concentração de cerca de 70 000 pessoas pelas actividades lúdicas que contempla.

3. Félix Escrig, Cubiertas rígidas transformables, *Hormigón e acero nº 193*, Madrid, 1994, pp. 89

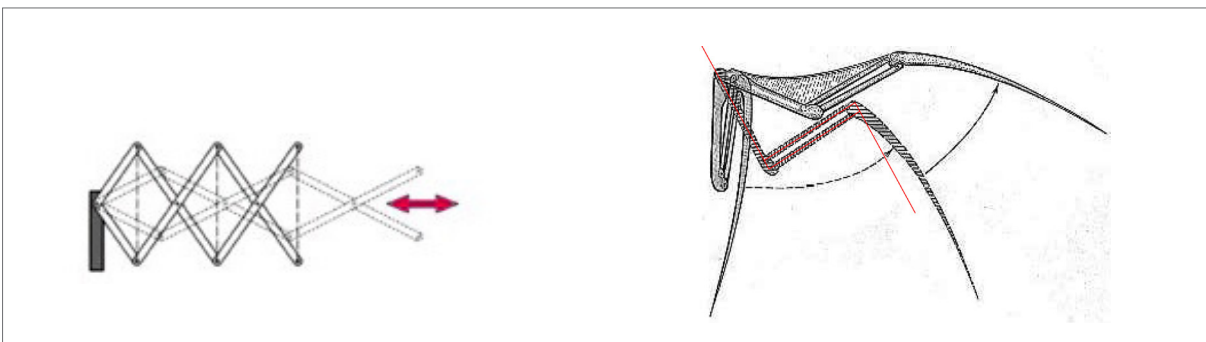
4. Idem, pp. 190



138. sistema pantógrafo; cópia de figuras a outra escala.



139. sistema pantógrafo; os mesmos elementos, diferentes configurações



140/1 sistema pantógrafo e asa de ave; princípio de funcionamento comum

3.2 sistemas tipo pantógrafo

O pantógrafo é um instrumento criado no século XVIII para técnicas de medição. É constituído por quatro peças rígidas lineares articuladas – duas maiores e duas menores paralelas entre elas duas a duas – de forma a permitir desenhar a cópia de figuras a outra escala, aplicando a redução ou a ampliação.

O interesse deste instrumento do ponto de vista cinético está nas diferentes configurações geométricas que possibilita quando multiplicado. Outra característica está na particularidade da forma como os elementos se articulam: *“as peças que formam um “x” estão articuladas em três pontos, todas com liberdade de rotação no plano que formam. O movimento que se inicia num quadrilátero – resultante do encadeamento das peças em “x” – propaga-se aos quadriláteros adjacentes. O movimento inicial de um obriga ao movimento de todos, pela particularidade da forma como se articulam”*⁵, o que significa que para alterar a configuração geral do objecto basta mexer num módulo. Curiosamente este princípio mecânico corresponde ao mecanismo de movimento das asas das aves – que corresponde à estratégia de articular uma estrutura rígida com o mínimo de mecanismos de movimento – que, tal como o sistema pantógrafo são igualmente estruturas rígidas constituídas por quatro ossos articulados – dois maiores e dois menores que se mantêm paralelos dois a dois. Pode considerar-se o movimento da asa da ave um *“movimento automático” porque a partir de um ponto – clavícula – comanda o resto da estrutura da asa. “Quando a ave voa as asas estendem-se numa superfície plana e os seus batimentos são efectuados apenas ao nível do ombro, proporcionando rigidez e poupando energia ao evitar movimentos desnecessários.”*⁶ Através da articulação dessas barras nos seus nós extremos com o mesmo mecanismo forma-se uma estrutura expansível bidimensional.

5. Lina Puertas del Rio, *Estructuras espaciales desmontables e despleables*, Madrid, 1990, pp.44

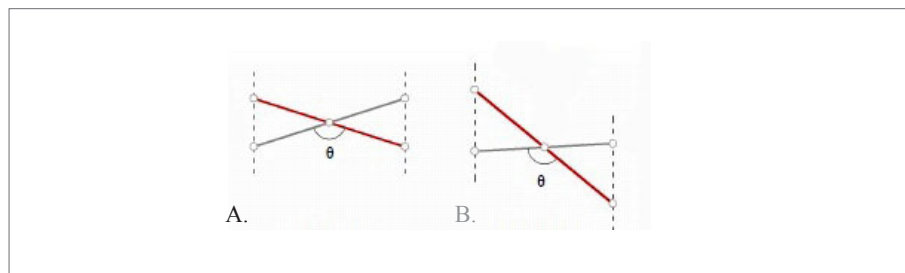
6. Noble S. Proctor and Patrick J. Lynch, *Manual of Ornithology : Avian Structure & Funcional*, New Haven, Yale University Press, 1993, pp. 57

Na prova de doutoramento *Design and Analysis of deployable bar structures for mobile architectural applications* o engenheiro Niels de Temmerman investiga os possíveis tipos de “unidades pantógrafo” em função da alteração da localização dos nós intermédios ou do comprimento das barras. Nesse sentido, categoriza três grupos distintos de módulos, que designa: “*unidades de translação*”, “*unidades polares*” e “*unidades angulares*”⁷ São tipologias de módulos distintos presentes nas soluções desenvolvidas desde Pérez (1960) até Chuck Hoberman (1990), o que justifica a pertinência da explicação de cada uma delas, também por considerar necessária a compreensão prévia de funcionamento da unidade para facilitar a compreensão do sistema. Nas estruturas baseadas em unidades de translação os nós intermédios estão situados no ponto médio das barras, independentemente do comprimento entre elas ser igual ou diferente. A figura abaixo representa as duas unidades de translação: na figura da esquerda as barras têm o mesmo comprimento, na figura da direita as barras não têm o mesmo comprimento.

142. unidades de translação:
a articulação interna é no
ponto médio das barras

A. unidade para coberturas
de superfície plana

B. unidade para coberturas
de superfície curva

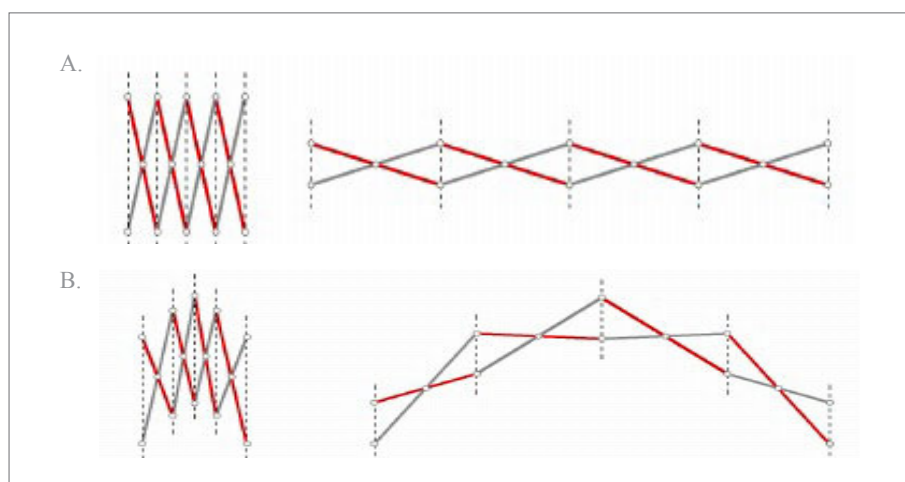


Com barras do mesmo comprimento obtém-se uma superfície plana, com barras de comprimentos diferentes obtém-se uma superfície curva. Em termos gráficos verifica-se que uma estrutura é constituída por unidades de translação quando as “linhas de chamada” – correspondentes à união das articulações externas – são paralelas entre si, útil para demonstrar a direcção do movimento da estrutura em fase de expansão: uma expansão unidireccional.

143. estrutura constituída por
unidades de translação:

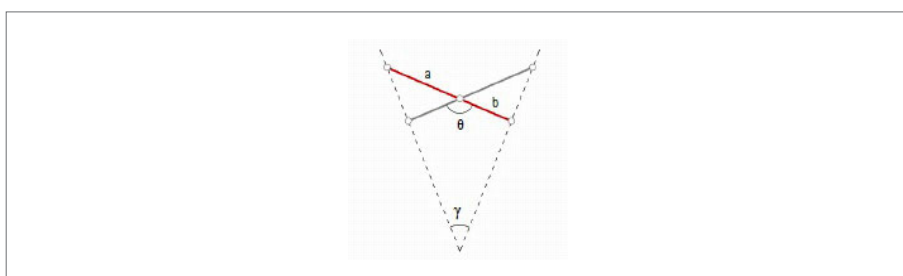
A. peças com o mesmo
comprimento

B. peças com comprimento
diferente



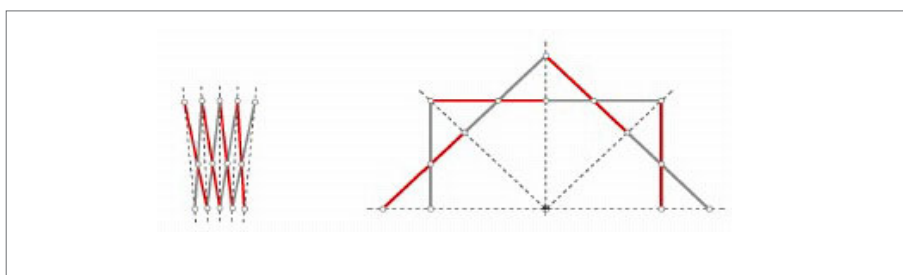
7. Niels de Temmerman, *Design and Analysis of deployable bar structures for mobile architectural applications*, VRIJE, Bruxelas, 2007, pp 10

O que difere as unidades de translação das unidades polares é a articulação interna: quando as barras têm o mesmo comprimento mas a articulação intermédia é deslocada – ou seja, é excêntrica às barras – as linhas de chamada das articulações externas convergem num ponto que designa “*ângulo γ* ”, demonstrando um sentido de expansão da estrutura bidireccional. “*É esta excentricidade da articulação intermédia que gera a curvatura durante a fase da abertura da estrutura.*”⁸ Neste sentido constata-se que a curvatura de uma estrutura pode ser alcançada através de duas abordagens: com barras de diferente comprimento articuladas nos respectivos pontos intermédios, ou com barras de igual comprimento em que a articulação é excêntrica às barras. Se nas “unidades de translação” a amplitude do ângulo é constante, nas “unidades polares” o ângulo tem grande amplitude de variação.

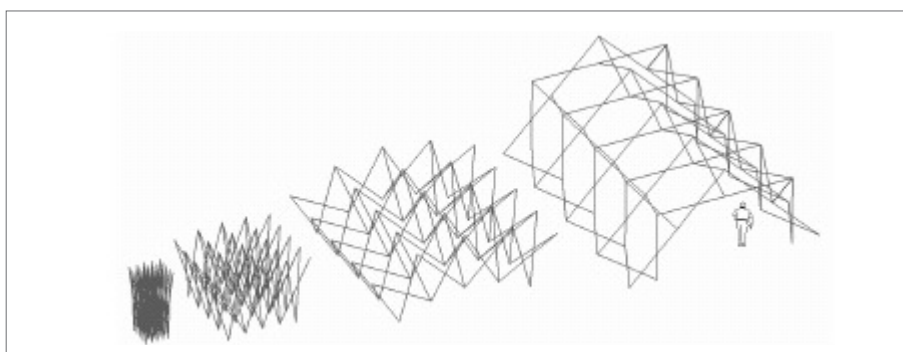


144. unidade polar:

a articulação interna é excêntrica às barras



145. estrutura constituída por unidades polares



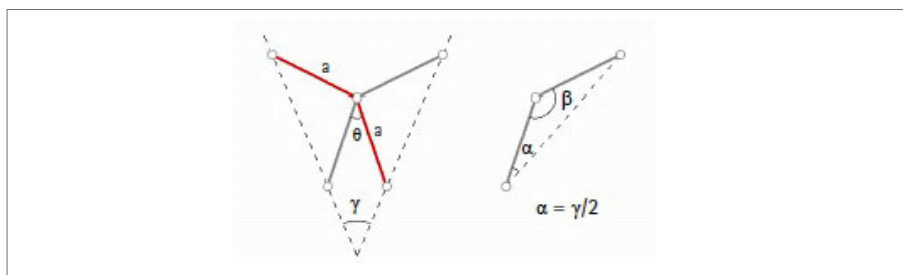
146. estrutura constituída por unidades polares: processo de expansão

8. Niels de Temmerman, *Design and Analysis of deployable bar structures for mobile architectural applications*, VRIJE, Bruxelas, 2007, pp 11

Tal como as “unidades de translação”, “as “unidades angulares” subentendem um ângulo constante em superfícies planas e curvas. Ao contrário das unidades de pantógrafo constituídas por duas barras, as unidades angulares consistem em quatro barras articuladas. Pelo facto deste sistema ter sido inventado pelo arquitecto Chuck Hoberman em 1990, são geralmente designadas como unidades de Hoberman. A maior vantagem é que, ao contrário das unidades polares, as unidades angulares subentendem um ângulo constante durante a fase de abertura da estrutura. “Para isto ocorrer, a geometria da barra tem que ser tal que permita $\alpha = \gamma/2$. Isto implica que os elementos angulares podem ser utilizados para estruturas radialmente fechadas, com capacidade de se recolherem para o seu próprio perímetro, o que é impossível de realizar com as unidades de translação ou polares, que demonstram uma expansão linear.”⁹ A figura abaixo mostra uma ligação circular constituída por unidades angulares no seu estado aberto e fechado. Estas estruturas são caracterizadas por uma distribuição radial, permitindo que a estrutura se retraia no sentido do seu perímetro.

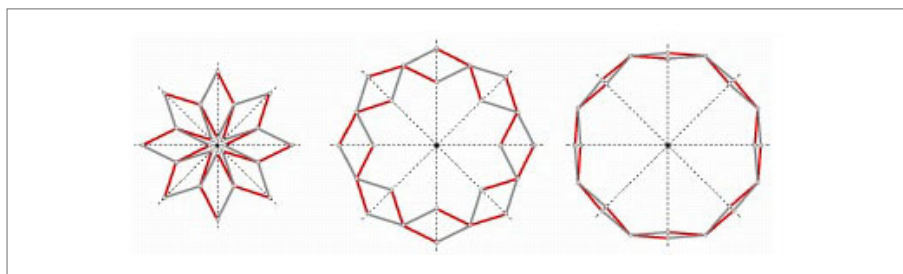
147. unidade angular:

a articulação interna é equidistante às 4 barras



148. estudo de Chuck Hoberman,

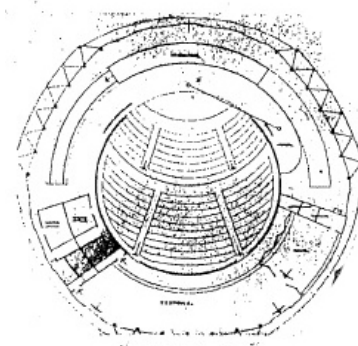
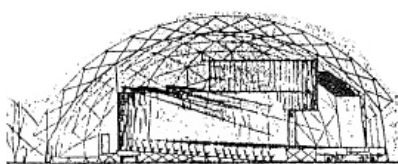
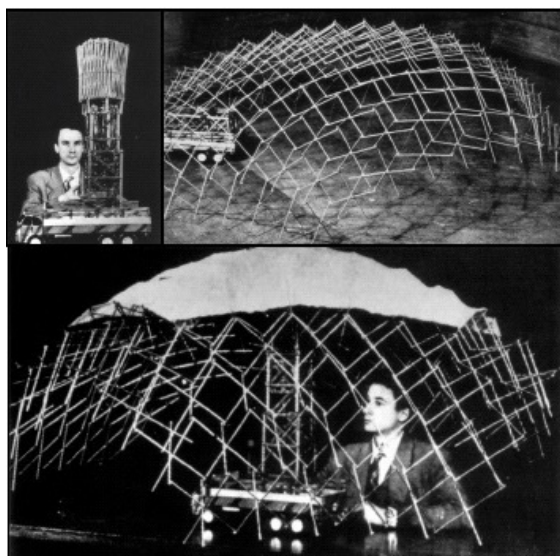
estrutura constituída por unidades angulares, a estrutura expande-se no sentido do seu perímetro



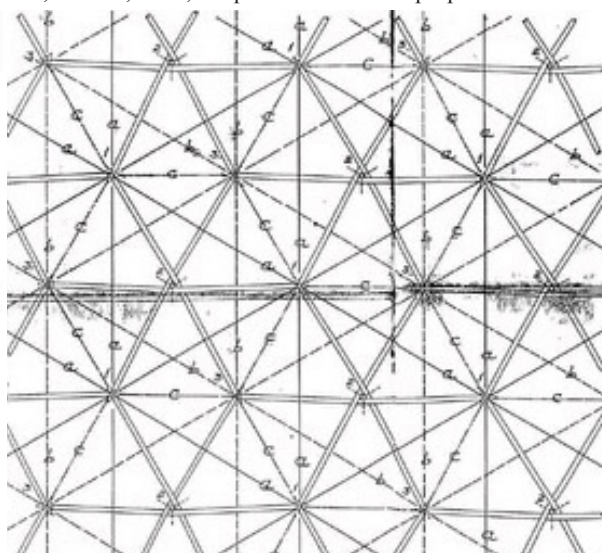
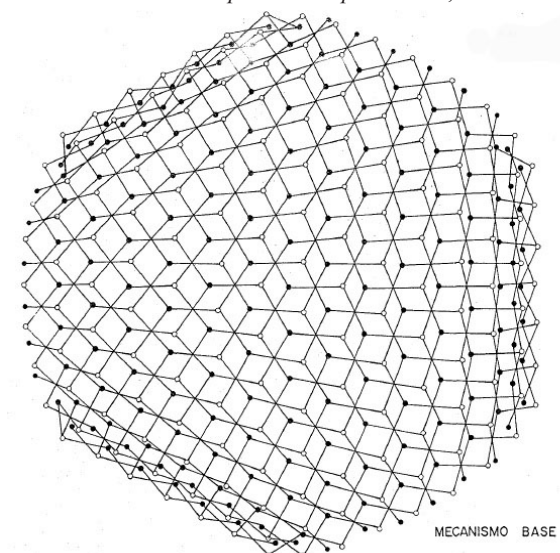
“A estrutura mostrada na figura acima é formada por duas camadas de elementos angulares. Umas são formadas por elementos que rodam na direcção dos ponteiros do relógio (marcado a cinza), enquanto que as outras estão dispostas na direcção contrária aos ponteiros do relógio (assinalado a vermelho). Cada camada sofre uma rotação de igual magnitude mas opostas uma à outra.”¹⁰

9. Niels de Temmerman, *Design and Analysis of deployable bar structures for mobile architectural applications*, VRIJE, Bruxelas, 2007, pp 21

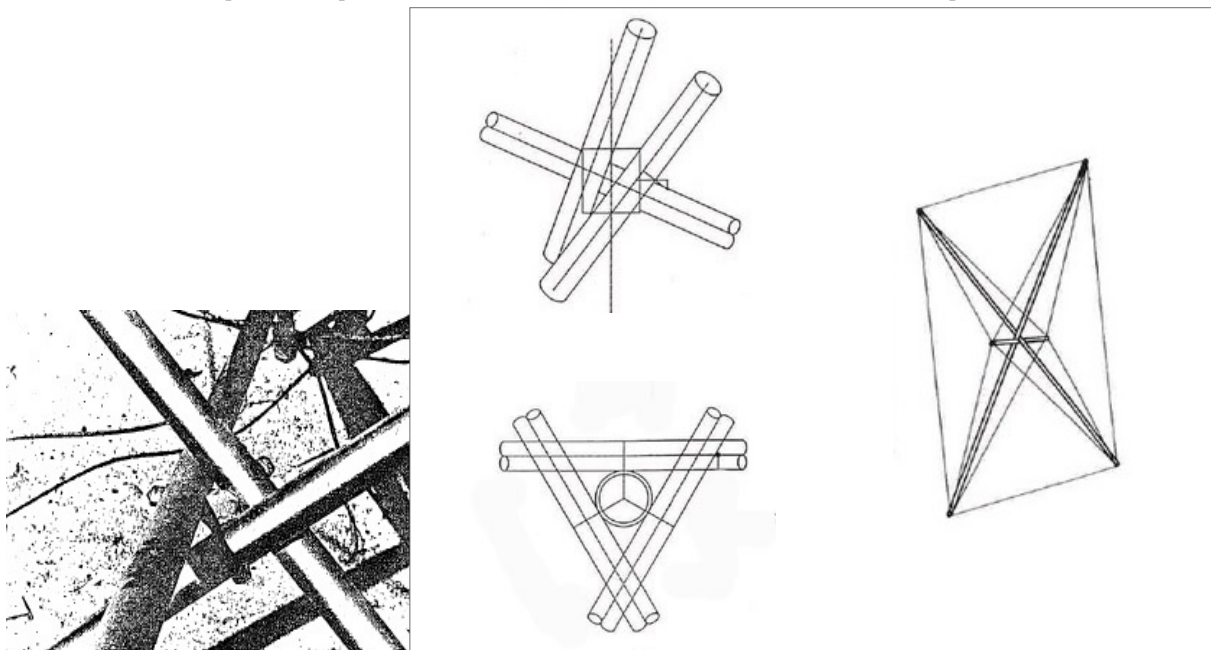
10. Idem, pp.22



149. *Teatro ambulante para 500 espectadores*, Emilio Pérez Piñero, Madrid, 1961; maquete e desenho da proposta



150. *Teatro ambulante para 500 espectadores*, Emilio Pérez Piñero, Madrid, 1961; axonometria e planta da cobertura



151. *Teatro ambulante para 500 espectadores*, Emilio Pérez Piñero, Madrid, 1961; módulo base, três peças articuladas;

3.2.1 Emílio Pérez Piñero

O contributo de Pérez para as estruturas rígidas transformáveis está na transferência do princípio mecânico do sistema pantógrafo para o campo da arquitectura, com a solução que propõe em 1961 para um concurso de âmbito académico promovido pela União Internacional de Arquitectos¹¹, cujo tema é “novas técnicas e novos materiais de construção”. A sua proposta é o *Teatro ambulante para 500 espectadores*. “A solução de Pérez consiste numa distribuição em arcos de círculos concêntricos, dispondo o programa de necessidades mínimas necessárias para o uso pedido.”¹² Nesta proposta, a inovação está na cobertura: uma cúpula de peças rígidas lineares metálicas em forma de rede “tipo pantógrafo” de dupla camada, que para facilitar as questões logísticas de transporte é uma estrutura que tem a capacidade de ser transportada compactada enquanto peça única, e expandir-se facilmente desde o camião que a transporta. “Seria revestida com uma lona que se fixava aos nós da estrutura.”¹³

Utilizando o sistema pantógrafo como módulo multiplica-o até formar uma rede em forma de cúpula e duplica-a para formar duas camadas para dar espessura e rigidez à cúpula, ligadas por barras perpendiculares às respectivas redes bidimensionais. Nesse sentido considera-se que o módulo base da estrutura é constituído por três barras articuladas, que em planta formam triângulos equiláteros quando multiplicados. Este modelo em particular é constituído por barras rígidas e tirantes de aço, que se irão traccionar para fornecer à estrutura a estabilidade necessária. “Os cabos que unem os nós de ambas as superfícies são fixados depois da estrutura estar aberta e impedem o movimento anterior em sentido contrário.”¹⁴ A característica fundamental da cúpula é que se expande e recolhe enquanto peça única, mantendo todas as suas peças – cabos, membrana, peças rígidas ocas de secção circular. Paralelamente, a transformação de estado recolhido para expandido pode ser feita apenas com uma força aplicada num ponto – em que a força pode ser a mão, por exemplo.

11. A comissão do concurso eram pessoas reconhecidas no campo estrutural como Fuller e Félix Candela

12. Lina Puertas del Rio, *Estructuras espaciales desmontables y desplegadas: estudio de la obra del arquitecto Emilio Pérez Piñero*, Madrid, ETSA, 1989, pp. 20

13. Ibidem

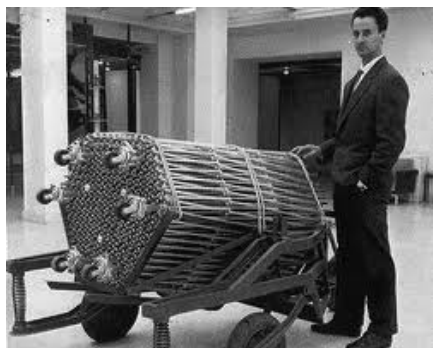
14. Idem, pp.21

A proposta de Pérez Piñero para o teatro itinerante, pelo âmbito do concurso, não abordou todos os problemas inerentes a um projecto real, nomeadamente os tipos de apoio, resistência das peças para vencer vãos de grande dimensão e esforços reais, preocupando-se mais na definição do sistema reticulado e no seu funcionamento. Os problemas de estabilidade e de peso que esta cobertura tinha foram abordados em 1966 com o protótipo *Cupula Desplegable para grandes Luces*, promovido por ele próprio. O ano provável de execução deste sistema é em 1966 pelo facto de o ter apresentado na Conferência Internacional sobre estruturas tridimensionais, ocorrida em Londres em Setembro de 1966. É um modelo de estudo para o ensaio de soluções relacionadas com o movimento das articulações para estruturas que pretendam o alcance de vãos de grandes dimensões.

152. *Cupula Desplegable para grandes luces*, Emilio Pérez Piñero, 1966

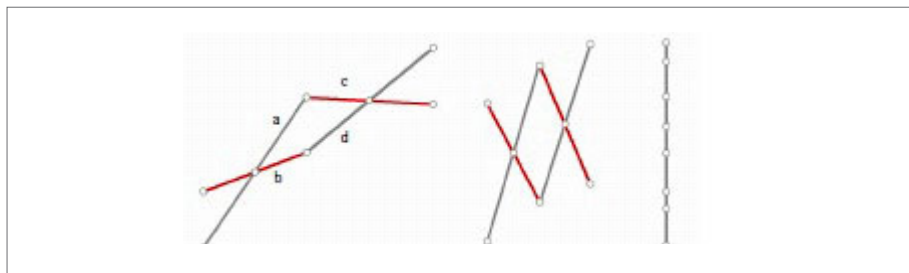
estrutura em estado recolhido e expandido;

é uma estrutura que pretende alcançar vãos de grande dimensão



A restrição da posição da estrutura é crucial para o projecto de estruturas em pantógrafo. Há uma fórmula deduzida por Pérez Piñero que afirma que para estruturas desta categoria serem viáveis, “a soma do semi-comprimento *A* e *B* de uma unidade pantógrafo tem que ser igual à soma do semi-comprimento *C* e *D* da unidade adjacente.”¹⁵ Isto traduz-se teoricamente na capacidade das barras coincidirem quando em estado compactado. Na prática significa que o sistema de articulação da estrutura se recolhe num conjunto compacto de barras. “A fórmula de Pérez relativa à restrição da posição da estrutura traduz-se em “ $a+b = c+d$ ”.”¹⁶

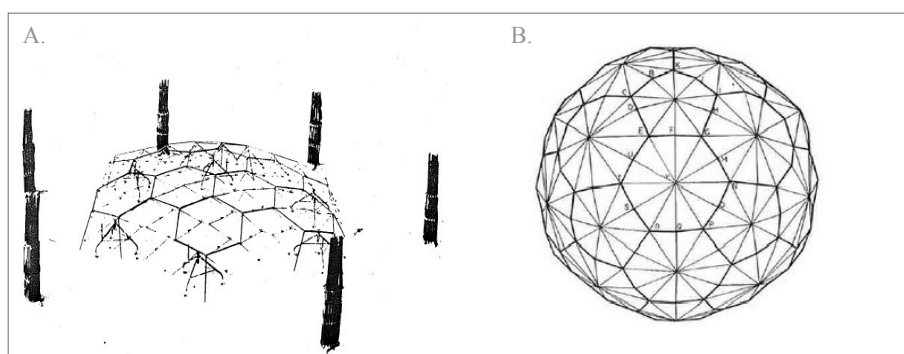
153. estudo de Pérez Piñero para as barras coincidirem, quando em estado recolhido



15. Niels de Temmerman, *Design and Analysis of deployable bar structures for mobile architectural applications*, VRIJE, Bruxelas, 2007, pp 13

16. Ibidem, pp.13

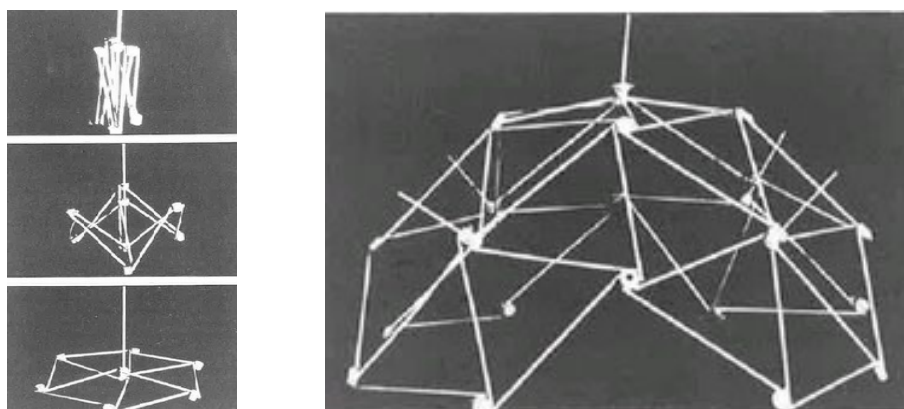
No projecto *Cúpula Desplegable para grandes Luces* desenvolve um protótipo de uma cúpula com 20m de diâmetro concebida tendo como base num icosaedro. Foi executado para comprovar as suas características quando transpostas para a construção de uma cúpula com 60m de diâmetro. O modelo é formado por sete partes – seis periféricas e uma central – executadas em separado, formando unidades compactadas distintas, que se montam unindo os nós comuns para formar a cúpula. Segundo o arquitecto, uma cúpula de 60m de diâmetro correspondente a uma só unidade modular seria inviável, não manejável e instável. O mecanismo base, composto por pirâmides duplas de base triangular, ordena-se de forma em que no plano dos apoios os vértices comuns – ou seja, ponto de articulação das peças lineares em “x” – forma uma rede equilátera contida num triângulo de icosaedro. O módulo hexagonal explica o princípio de funcionamento de recolha e expansão da estrutura. Vários módulos articulados formam poliedros com as mesmas características de maleabilidade, como é exemplo a cúpula. No entanto, segundo Escrig, *“mesmo assim não passou de um protótipo: a complexidade dos mecanismos fazia da estrutura um artefacto elaborado e caro.”*¹⁷



154. *Cúpula Desplegable para grandes luces*, Emilio Pérez Piñero, 1966

A. partes componentes da cobertura

B. cúpula a partir de icosaedro



155. “Cúpula para grandes vãos”, Emilio Pérez Piñero, 1966, maquete

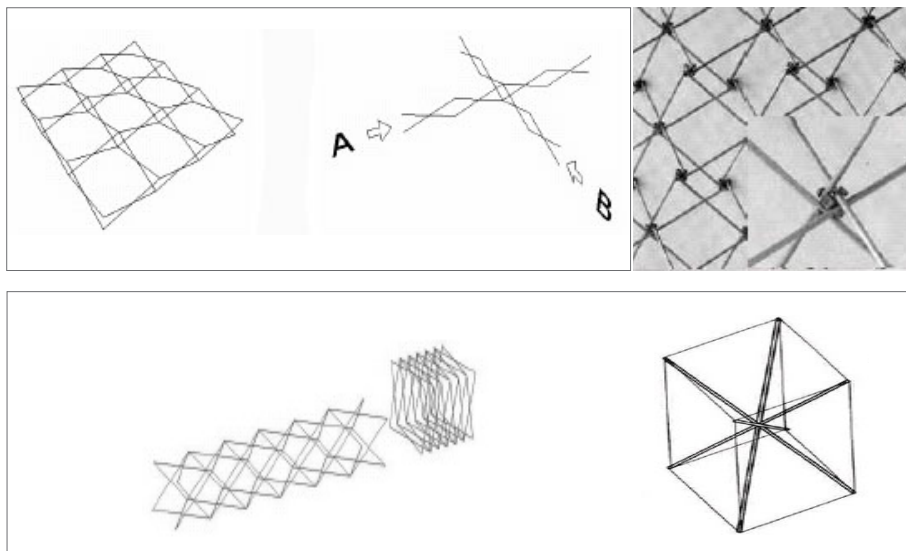
cúpula formada por quatro hexágonos e um quadrado de articulação central

17. Félix Escrig, Juan Pérez Valcárcel, José Sánchez, *La cubierta de la piscina de San Pablo de Sevilla*, Hormigon y acero 1º trimestre, pp.85

Os exemplos até agora referidos são protótipos executados para desenvolvimento do sistema cinético com o propósito de combater as adversidades logísticas de transporte e de vencer vãos de grande dimensão, sem o objectivo de responder a um programa específico. A primeira proposta para aplicação real é o *Pabellon Transportable para Exposiciones*, implementado em 1964, em Barcelona e Madrid. Os requisitos práticos consistem na adaptação da solução às características físicas dos distintos locais de implantação e em ser facilmente montável, desmontável e transportável pelo tempo escasso para a própria instalação. Com esse propósito idealiza uma cobertura plana constituída por módulos de quatro peças de igual dimensão articuladas num ponto intermédio comum, o que significa que intersecta em duas direcções o sistema “tipo pantógrafo” – perpendiculares entre si – e aplica as designadas “unidades de translação”.

156. *Pabellon Transportable para Exposiciones*, Emílio Pérez Piñero, 1964

pormenores do sistema construtivo



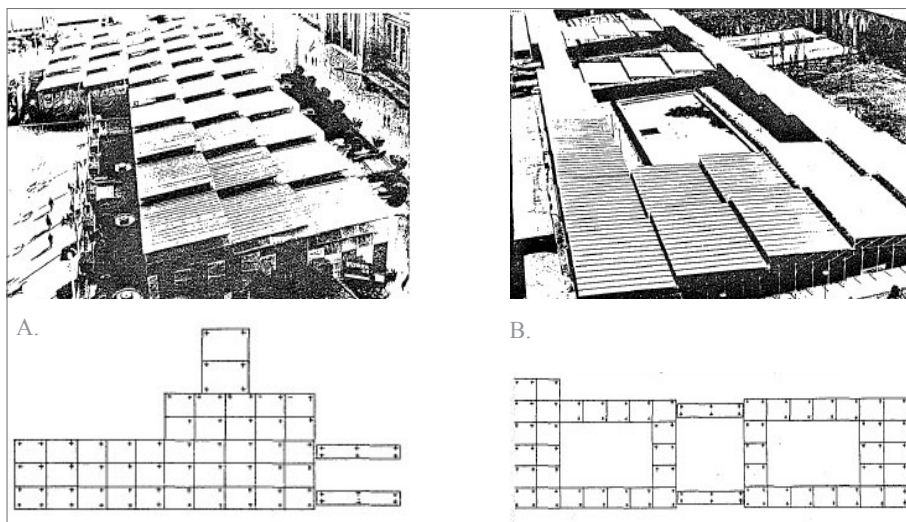
Cada módulo tem 0.80 x 0.70m em estado recolhido e 12 x 9m em estado expandido. É uma solução modular com cerca de 8000m² de área de superfície, que permite várias disposições das peças que configuram diferentes geometrias da cobertura, como se vê nas plantas.

157. *Pabellon Transportable para Exposiciones*, Emílio Pérez Piñero, 1964

possibilidades de disposição dos módulos da estrutura

A. implantação em Barcelona

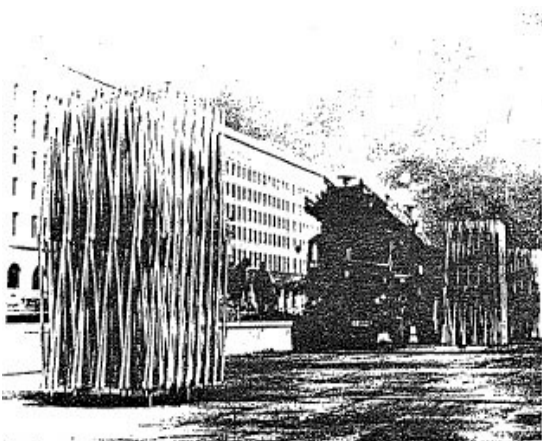
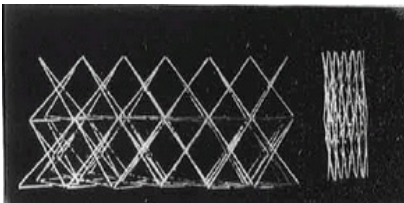
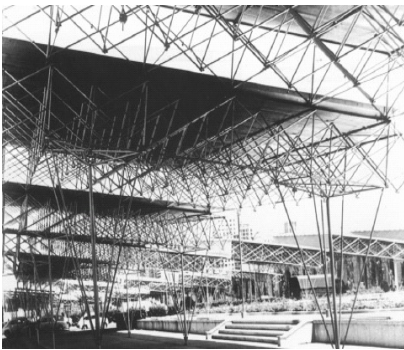
B. implantação em Madrid



As estruturas de Pérez Piñero são sistemas em rede bidimensionais, que se multiplicam de forma a alcançar uma superfície dupla. Mais do que propostas executadas para responder a programas específicos o contributo de Pérez está no estudo dos sistemas construtivos referidos através de protótipos financiados por ele próprio, apresentados em conferências. Serviu de inspiração a outros investigadores, como é o caso do arquitecto Félix Escrig que tem desenvolvido e optimizado os seus sistemas a partir da década de 80.

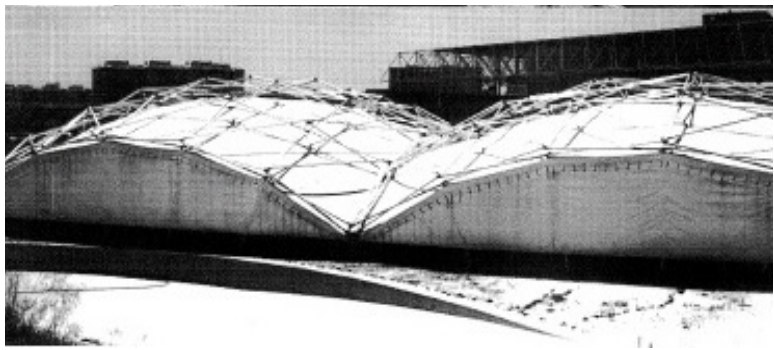
158. *Pabellon Transportable para Exposiciones*, Emilio Pérez Piñero, 1964

cobertura de superficie plana



159. *Cubierta Desplegable de la Piscina San Pablo de Sevilla*, Sevilha, 1996

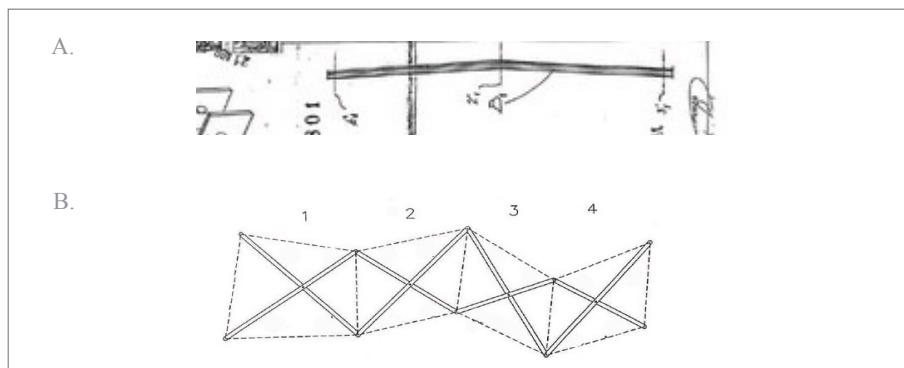
cobertura de superficie curva



3.2.2 Félix Escrig

Os sistemas de Escrig são o desenvolvimento dos sistemas impulsionados por Pérez, com o objectivo de os otimizar, sendo o exemplo mais ilustrativo a estrutura *Cubierta Desplegable de la Piscina San Pablo de Sevilla*, 1996, Sevilha, para uma piscina olímpica. É uma proposta que retoma o sistema de Pérez aplicado em 1964 no *Pabellon Transportable para Exposiciones*. A cobertura plana de Pérez é agora aplicada por Escrig enquanto superfície curva, com o objectivo de cobrir a piscina durante o Inverno para efeitos de climatização. Outro requisito é que a cobertura seja removida no Verão sem deixar vestígios no solo.

Nos projectos de Pérez verifica-se que utiliza módulos base de três ou quatro peças que se articulam num ponto intermédio comum. Segundo Escrig *“isto tem o inconveniente de que esse ponto requer um nó de grandes dimensões para que as peças articuladas se expandam o suficiente para com isso serem úteis. As dimensões dos nós provocam grandes excentricidades que implicam problemas estruturais, uma vez que se introduzem flexões permanentes nas peças relacionadas com a geometria e não com as forças externas. Pérez Piñero resolveu excentricidades através de peças rígidas encurvadas, mas isso não evitava as flexões pelas deformações impostas.”*¹⁸



160. detalhes das peças utilizadas por Pérez e Escrig para otimizar a estabilidade das coberturas

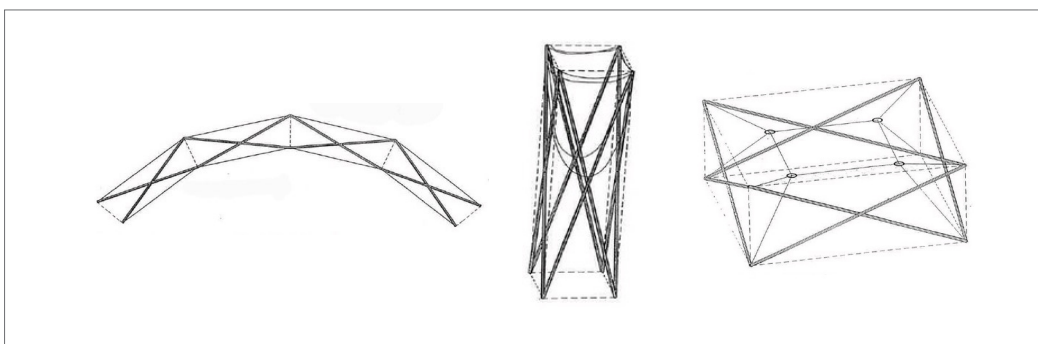
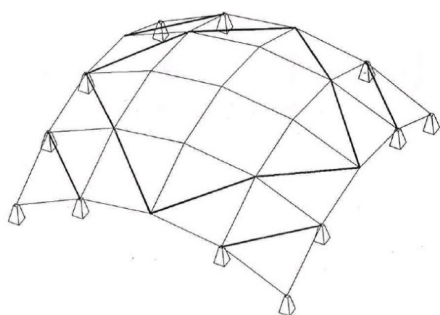
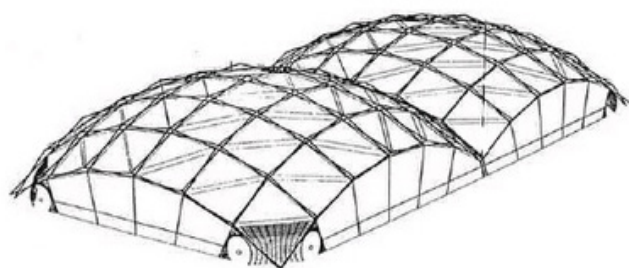
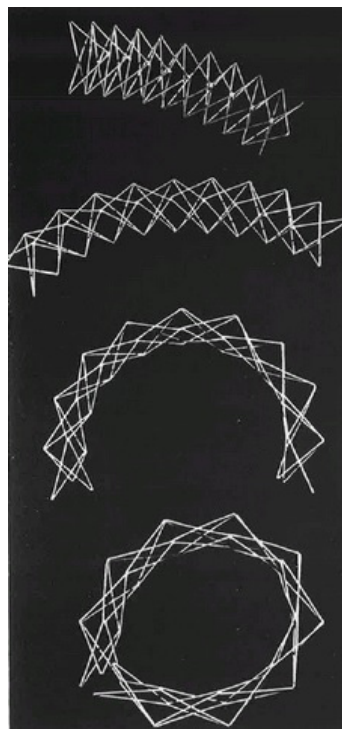
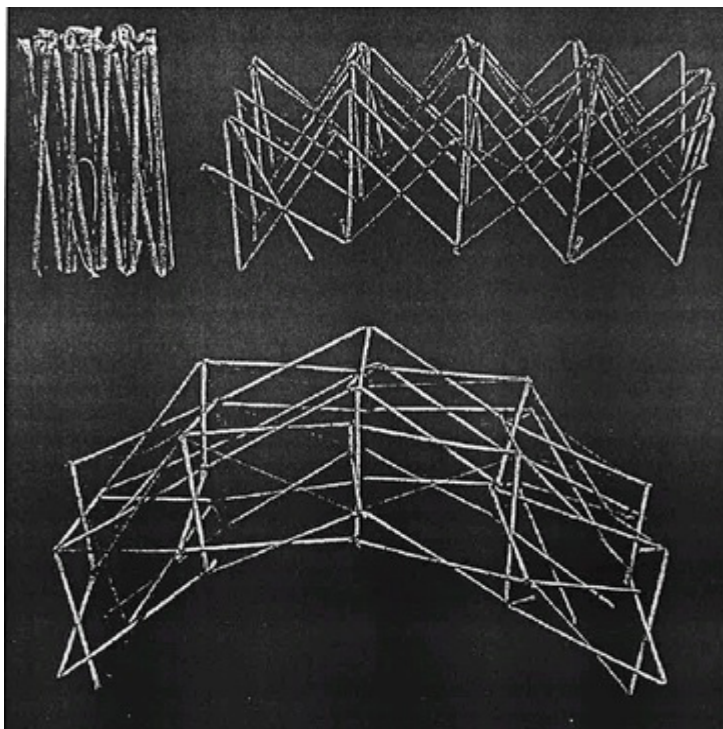
A. peça flectida, Pérez Piñero

B. sistema de unidades polares, Félix Escrig

A estrutura que Escrig propõe para a Piscina de San Pablo *“pretende evitar, ou pelo menos minimizar os esforços da estrutura. No entanto a estrutura continua a trabalhar à flexão. Como critério, todas as peças são iguais e a articulação interior não está no ponto médio das mesmas.”*¹⁹ Nesse sentido desloca a articulação intermédia das barras: se o sistema de Pérez tem as barras articuladas a eixo – correspondentes às “unidades de translação” – Escrig mantém o comprimento das barras mas desloca a articulação intermédia entre elas, que passa a ser excêntrica e a permitir uma amplitude de variação de ângulo maior – correspondentes às “unidades polares”, constatando-se que Escrig introduz o sistema das “unidades polares”.

18. Félix Escrig, Juan Pérez Valcárcel, José Sánchez, La cubierta de la piscina de San Pablo de Sevilla, Hormigon y acero 1º trimestre, pp.91

19. Ibidem



161. *Cubierta Desplegable de la Piscina San Pablo de Sevilla*, Sevilla, Félix Escrig, 1996.

Isto significa que a estrutura expandir-se-á em arco, ainda que tenha liberdade para se expandir de forma linear. Segundo Félix Escrig, *“pode escolher-se o ângulo de inclinação da cobertura. Outra das vantagens deste tipo de sistema é que, embora as barras não estejam sempre no mesmo plano os seus respectivos nós superiores e inferiores estão. Isto permite articular várias coberturas entre si, cobrindo superfícies maiores a partir de coberturas mais reduzidas.”*²⁰

“A estabilidade estrutural deste tipo de redes é condicionada pelo número de apoios perimetrais.”²¹ Se as estruturas com duas direcções são sistemas que se adequam a coberturas planas – constatado na proposta de Pérez em 1964, quando o sistema é transposto para coberturas de superfície curva *“requer considerações específicas, tais como barras transversais ou cabos para estabilizar a estrutura na sua configuração em estado expandido, devido à sua instabilidade causada pela ausência de triangulações.”*²² A figura seguinte mostra o número mínimo de diagonais e apoios necessários para a estabilidade do conjunto.

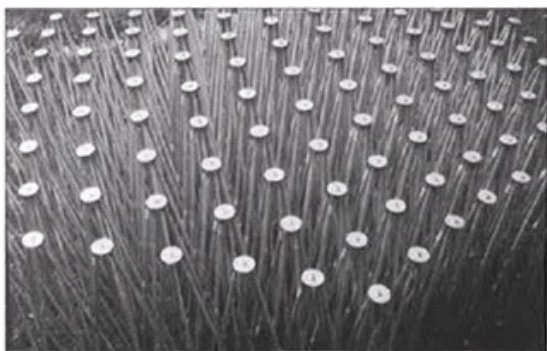
Outra adversidade, também de carácter geométrico, consiste na incorporação da membrana na estrutura de forma a ser compatível – nas suas dimensões – com as fases de abertura da estrutura. Segundo Escrig *“a cobertura pode situar-se na superfície superior, na inferior ou em ambas. No entanto queremos que na fase de recolha da estrutura a membrana permaneça ordenadamente dentro da mesma, em detrimento de ficar de qualquer maneira.”*²³ Escrig optou por revestir as duas superfícies da estrutura – superior e inferior. A solução consiste em fixar a membrana exterior à interior nos pontos das diagonais.

20. Félix Escrig, Juan Pérez Valcárcel, José Sánchez, *La cubierta de la piscina de San Pablo de Sevilla*, Hormigon y acero 1º trimestre, pp.92

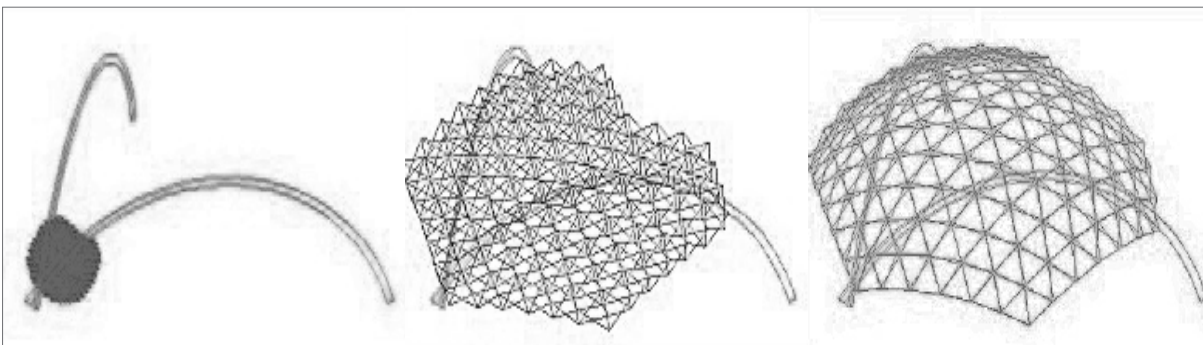
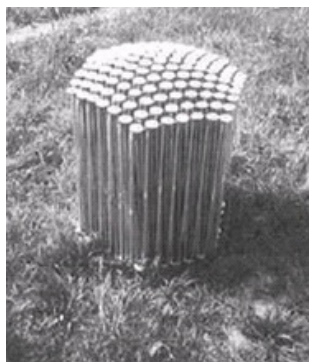
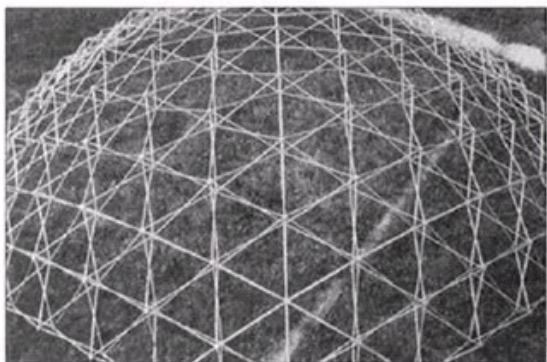
21. I, pp. 93

22. Niels de Temmerman, *Design and Analysis of deployable bar structures for mobile architectural applications*, VRIJE, Bruxelas, 2007, pp. 14

23. C.f. Félix Escrig, *La cubierta de la piscina de San Pablo de Sevilla*, Hormigon y acero 1º trimestre, 1996, pp.95

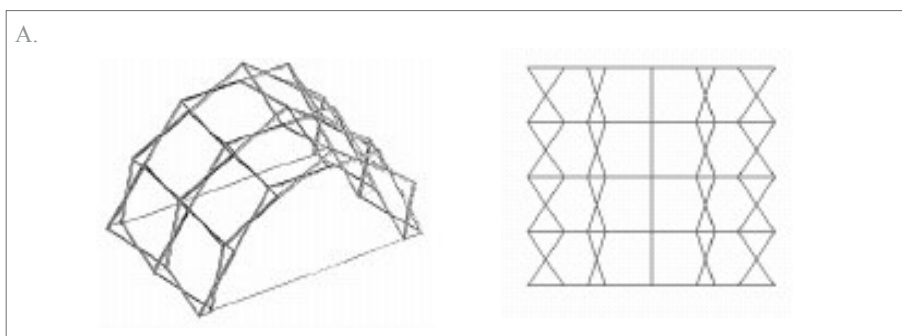


prototipo a escala 1:20



162. *Cubierta Desplegable para Estadio Innsbruck*, Félix Escrig, Áustria, 1999

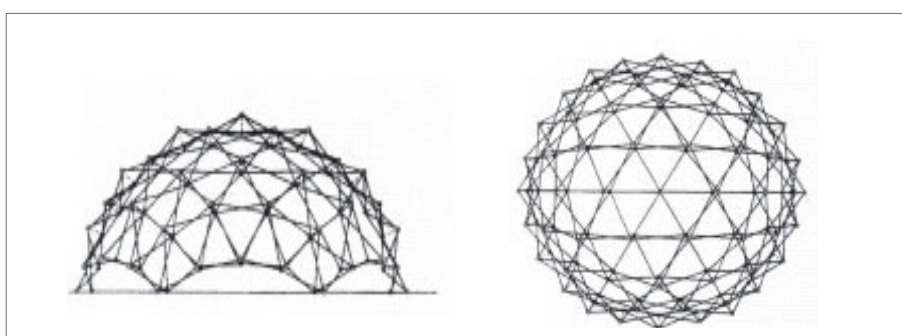
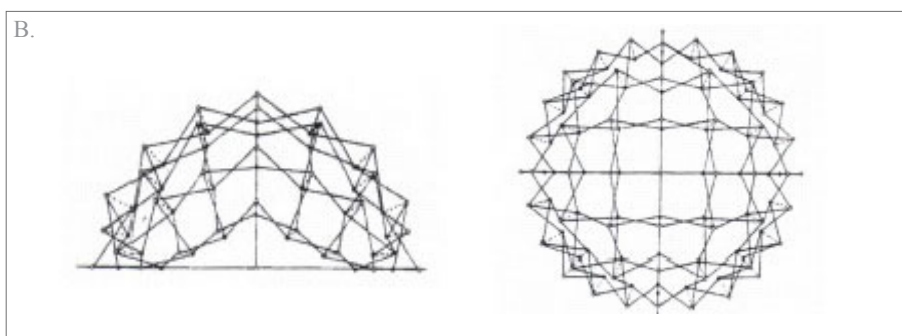
As figuras abaixo demonstram estudos prévios propostos por Escrig na década de 80, baseados em superfícies bidireccionais e tridireccionais de curvatura única – sistema abobadado – e de dupla curvatura – sistema geodésico. O modelo que aplica para a piscina de San Pablo corresponde ao sistema abobadado.



163. estruturas bidireccionais constituídas por unidades polares, Escrig, 1985

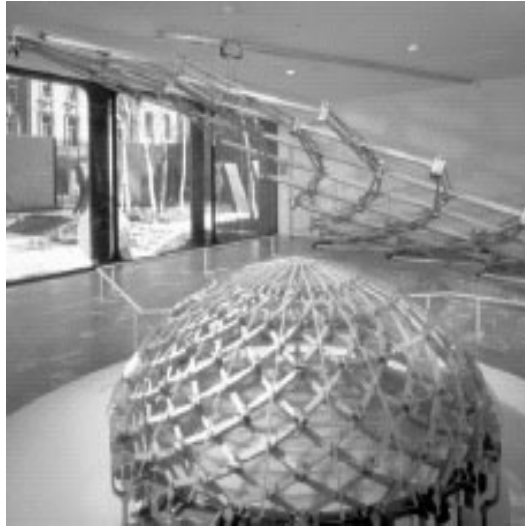
A. sistema abobadado

B. sistema geodésico

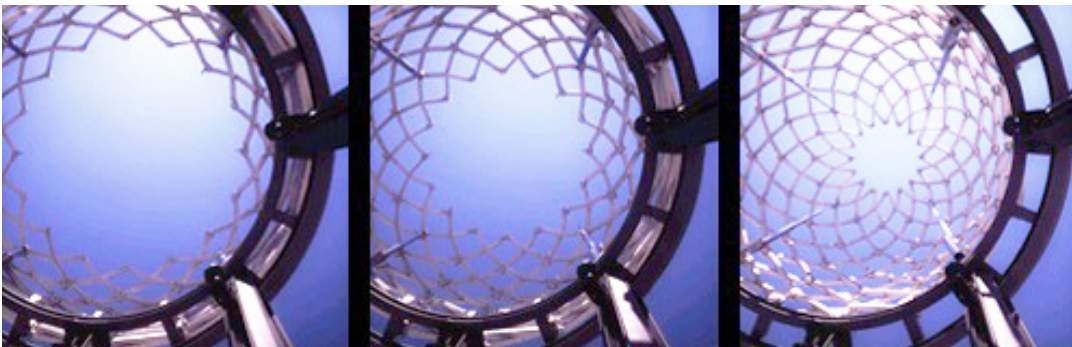


164. estrutura tridireccional constituída por unidades polares, Escrig, 1987

O sistema geodésico de superfície com tres direcções é aplicado na proposta *Cubierta Desplegable para Estadio Innsbruck*, Áustria, 1999. Consiste numa cúpula com 120m de diâmetro que encerra espaço com 30m de altura. A particularidade desta intervenção está no recurso do arco como suporte da cobertura. A superfície em rede de padrão triangular expande-se sobre dois arcos que a suportam, combatendo a necessidade de recurso a elementos adicionais – como os cabos – que garantam a estabilidade da estrutura.



165. *Iris Dome*, Chuck Hoberman, *MoMa*, Nova Iorque, 1994.



166. *Iris Dome*, Chuck Hoberman, *Exposição Internacional*, Hannover, Alemanha, 2000.



167. *Expanding geodesic dome*, Chuck Hoberman, New Jersey, 1991.

3.2.3. Chuck Hoberman

Mais recentemente, Chuck Hoberman tem contribuído para este tema, através da introdução de uma variação do sistema pantógrafo: as “*unidades angulares*”. “*As unidades angulares articuladas via sistema pantógrafo subentendem um ângulo constante em superfícies planas e curvas.*”²⁴ Isto foi descoberto por Hoberman em 1991, que propôs a cúpula *Iris Dome* em 1994 num protótipo demonstrado no Museu de Arte Moderna (*MoMa*) em Nova Iorque. A estrutura tem a possibilidade de incorporar superfícies rígidas como material de revestimento, que quando a cobertura esta fechada formam uma superfície contínua e em estado aberto as placas sobrepõem-se, por sistema de automação. No entanto o modelo implantado não considera o revestimento, sendo apenas demonstrado um excerto da estrutura com sistema de funcionamento para uma cúpula de 100m de diâmetro e outro protótipo de dimensão reduzida. No ano 2000 na Exposição Internacional em Hannover, Alemanha, propõe este sistema enquanto cobertura, com 10m de diâmetro, para reabilitação de um edifício. A estrutura recolhe e expande através de quatro braços hidráulicos dispostos no interior da cobertura, através de um sistema de controlo automatizado. A proposta pretende apontar uma solução de cobertura para a reconstrução da Catedral *Frauenkirche*, na Alemanha, destruída no contexto da Segunda Guerra Mundial. A dimensão do modelo corresponde à pretendida para a aplicação na Catedral.

Em 1991, com o protótipo *Expanding geodesic dome* retoma o sistema de geodésicas expansíveis aplicado por Escrig na cobertura para o Estádio Innsbruck. Foi um modelo implementado em New Jersey. Tem 1,5 metros de diâmetro em estado recolhido e 6 metros de diâmetro em estado expandido. É uma cobertura que, tal como as propostas das geodésicas de Fuller, derivam do icosaedro. Por esse motivo a cobertura em estado expandido tem a mesma forma e padrão triangular das geodésicas estáticas desenvolvidas por Fuller.

Como síntese importa reter que a combinação, numa só estrutura, de mecanismos de movimento de translação com rotação é uma característica peculiar que possibilita a alteração geométrica da respectiva estrutura, com capacidade de voltar ao estado inicial. Esta característica é particularmente relevante para estruturas de peças rígidas, contribuindo para uma logística de transporte mais facilitada. Contrariamente às estruturas rígidas impulsionadas na etapa da industrialização, que são montadas e remontadas a partir das suas partes constituintes a cada nova localização, as estruturas cinéticas passam a ter a capacidade de se compactar e expandir enquanto peça única.

24. Niels de Temmerman, *Design and Analysis of deployable bar structures for mobile architectural applications*, VRIJE, Bruxelas, 2007, pp. 22

4. considerações finais

As coberturas rígidas adaptáveis que me propus estudar afiguram-se como prováveis soluções de abrigo para programas colectivos esporádicos no exterior correspondendo, em simultâneo, a uma solução mais adequada ao contexto socio-económico actual dominado pela crescente crise económica e desequilíbrio do meio ambiente. Nesse sentido, estabeleci para o estudo de coberturas quatro requisitos base: (1) a reutilização – para aplicação em vários locais e contenção de material, (2) a capacidade de variação formal – para adaptação a várias circunstâncias como o clima, a compatibilidade de múltiplos usos sobre o mesmo recinto, e a logística de transporte; (3) a capacidade de vencer vãos de grande dimensão – para poder abarcar elevado número de pessoas concentradas no recinto, tendo chegado às coberturas cinéticas transportáveis, e (4) a biomimética como ferramenta de projecto, pelo facto de conjugar os requisitos de leveza e mecanismos de movimento referidos.

Foram duas as principais condicionantes das coberturas com que me deparei: (1) a estabilidade da estrutura – condicionada pela dimensão do grande vão que tem que vencer, e pela incorporação de mecanismos de movimento; e (2) a logística de transporte – pelo volume que as peças ocupam. Com a referência à evolução cronológica constatei que o arco e a forma triangular se destacaram como a melhor solução para combater os problemas de estabilidade. O arco, para além de possibilitar vencer vãos sem apoios intermédios permite construção de vãos de maior dimensão – quando comparado com sistemas porticados – porque é menos susceptível de flectir: tem maior estabilidade e equilibrada distribuição de forças para os apoios. Nesse sentido optou-se pelo estudo de coberturas de superfície curva, em detrimento das planas. A forma triangular revela-se estável pelo facto de ser uma configuração que se “auto-bloqueia”, característica relacionada com o facto de a distribuição dos esforços nos segmentos estar limitada a dois “movimentos”: tracção e compressão, minimizando a flexão. Como soluções que conjugam o arco e a forma triangular assinala-se o contributo de Paxton, com estruturas treliçadas bidimensionais abobadadas, e o consequente contributo das geodésicas de Fuller, estruturas treliçadas tridimensionais, que permitem não só a concepção de recintos esféricos como também o desenvolvimento das cúpulas cinéticas como as propostas por arquitectos posteriores – como Emílio Pérez Piñero, Félix Escrig e Chuck Hoberman.

No que se refere ao seu transporte, a utilização de peças rígidas tridimensionais é uma condicionante que se intensifica quando se trata de sistemas de grandes vãos. Verificou-se que a logística de transporte de peças rígidas para estruturas de grandes vãos tem especial incidência como tema de projecto com Wachsmann a partir da década de 50, com o sistema de rótulas esféricas que propõe para rebater as peças minimizando, dessa forma, o volume da estrutura global quando armazenada. No entanto, tal como a restante construção transportável até à data, as estruturas que contemplam estes mecanismos de movimento continuam a ser transportadas em peças separadas. As estruturas são articuladas para efeitos de armazenamento, mas quando implantadas são estáticas. Contudo, a incorporação de mecanismos de movimento nos elementos estruturais insinuou-se como base de desenvolvimento dos sistemas cinéticos posteriores de estruturas rígidas, como as do tipo guarda-chuva, exploradas por Fuller e por Frei Otto; e as do tipo pantógrafo, exploradas por Pérez Piñero, Félix Escrig ou Chuck Hoberman. As estruturas tipo guarda-chuva e tipo pantógrafo revelam o contributo da cinética não só na diminuição da adversidade de transporte, como também na particularidade de não se desmontarem: são peças únicas, contrariamente às desenvolvidas até à década de 50. Para além das possibilidades logísticas que as estruturas tipo guarda-chuva e tipo pantógrafo representam, acrescenta-se a possibilidade de alcançar vãos de grande dimensão através da multiplicação das unidades base de cada sistema, com a particularidade de terem pontos de ancoragem reduzidos, como são exemplo as propostas de Frei Otto, as de Pérez Piñero, Félix Escrig e Hoberman. No que se refere aos sistemas tipo pantógrafo, acresce-se o facto de a mesma estrutura possibilitar diferentes configurações e/ou disposições no espaço, visível na proposta de Pérez Piñero para um pavilhão itinerante em 1964, ou nos estudos do próprio arquitecto – a mesma estrutura permite uma cobertura plana ou cobertura de superfície curva. As coberturas tipo pantógrafo e tipo guarda-chuva são estruturas autónomas do ponto de vista estrutural – auto-portantes – que por essa razão não se subordinam fisicamente ao edificado. Nesse sentido possibilitam domínios de aplicação mais alargados, que oscilam entre o complemento ao edificado ou isoladas dele – como por exemplo no espaço público ou na paisagem natural, observadas nas propostas de Frei Otto, Pérez Piñero ou Félix Escrig.

Outro aspecto relevante estudado nesta dissertação consistiu na convergência de soluções estruturais entre o campo da arquitectura e o da biologia, mesmo sem influência directa da biomimética por parte dos arquitectos, como se verificou com as geodésicas de Fuller e os micro-organismos radiolária, ou o sistema tipo pantógrafo de Pérez e a asa da ave. A convergência das soluções estruturais de ambos os campos – biologia e arquitectura – justifica-se por motivos da física estrutural: tanto as estruturas do campo da arquitectura como as do campo da biologia comungam da necessidade de resistir a forças externas impostas por fenómenos naturais, nos quais se inclui a pressão

gravítica como denominador comum e constante, salientando-se o facto de que as estruturas naturais são garantidamente eficientes, porque baseadas no mínimo de recursos e resultado de um processo de optimização multimilenar. Conjugando as duas variáveis referidas – a convergência de soluções de ambos os campos e o facto de as estruturas naturais serem soluções eficientes – posso constatar que, do cruzamento da arquitectura com o mundo natural, a biomimética é uma ferramenta que pode informar mais o projecto na fase de concepção e, por isso, mais produtiva. Interessa referir que as soluções estruturais por parte de arquitectos com influência directa na biologia se revelaram como avanços técnicos exponenciais no campo da arquitectura, como os sistemas de Gaudí, Paxton, ou Frei Otto, autores que vincaram uma charneira no percurso da história da actividade construtiva com estratégias que procuraram ultrapassar as limitações tecnológicas, ausentes de ferramentas de computação. Actualmente, o recurso à natureza como estratégia de concepção de projecto tem sido adoptado por vários arquitectos, não só pelos desafios de sustentabilidade que imperam e colocam a tónica na necessidade de promover uma gestão equilibrada de recursos, como também pelo contributo das possibilidades tecnológicas actuais para esse efeito.

No que se refere a sistemas cinéticos biológicos, as asas e as flores revelam-se objectos de estudo pertinentes para os critérios de variação formal incluídos nas coberturas transportáveis de grandes vãos que me propus estudar, pela relação do volume que as asas/flores ocupam em estado recolhido comparativamente à área de extensão que proporcionam em estado expandido. Porém, destacam-se no campo da arquitectura os sistemas baseados no princípio de funcionamento das asas, como o protótipo de Renzo Piano para uma cúpula cinética, ou as propostas de Frei Otto relativas aos sistemas tipo guarda-chuva. As soluções inspiradas nas flores encontram-se em estado de investigação para aplicação a pequenas dimensões, na indústria aeroespacial, facto que não invalida uma correspondência destes sistemas para grandes vãos no campo da arquitectura, através da multiplicação e articulação de unidades modulares de pequenas dimensões.

Como síntese, importa referir que a construção adaptável se justificou ao longo dos tempos, por motivos distintos. No que se refere a construções transportáveis, na etapa anterior ao século XIX, são habitações/abrigos provisórios de pequenas dimensões concebidos segundo propósitos de subsistência e emergência que incluem catástrofes políticas – associadas às campanhas bélicas, e catástrofes naturais. A partir do final do século XIX, verifica-se o aumento na dimensão das estruturas possibilitado pelo desenvolvimento tecnológico. Constata-se a expansão e aplicação da construção temporária para outros campos para além da habitação, como o entretenimento impulsionado pelo circo, o que remete para o propósito lúdico deste tipo de construção. Simultaneamente surgem os Pavilhões para as Exposições Internacionais motivados por um propósito didáctico,

nomeadamente o de testar, sistematizar ou enunciar um sistema estrutural com o objectivo de o adoptar como modelo para a actividade construtiva emergente expressando-se, por parte dos arquitectos, uma homogeneidade de objectivos baseada na preocupação da vertente política da cidade, que se prolonga até à década de 50 – justificada pelo contexto debilitado pela Segunda Guerra Mundial. Contudo, a partir da década de 60, desvanece-se a referida homogeneidade de objectivos que fundamentou os princípios compositivos da arquitectura do início do século. Abre-se uma pluralidade de estratégias a par do desenvolvimento técnico cada vez mais especializado, que conduzem a uma postura cada vez mais individual do arquitecto face às estratégias de intervenção a adoptar, entre as quais as do grupo Archigram. Apesar de no discurso crítico as soluções do grupo terem sido consideradas idílicas e desvinculadas das preocupações políticas dominantes, pelas propostas de programas colectivos esporádicos para espectáculo e consumo de massas, constata-se que o tipo de sistema transportável proposto lançou as bases dos princípios da construção dos programas lúdicos das décadas posteriores, como os Jogos Olímpicos ou os festivais.

Actualmente prevalece a referida dissipação de objectivos comuns que caracterizou a arquitectura na primeira metade do século XX, sendo a postura do arquitecto na sociedade baseada nas suas próprias convicções e ideologias. Como refere Rem Koolhaas no discurso do prémio Pritzker, em 2000: “Em 1950 o mundo da arquitectura não era sobre um indivíduo, era sobre um grupo, o movimento. (...) Os arquitectos eram seguros do seu enquadramento na sociedade. Agora estamos em 2000, cinquenta anos depois desta caricatura idílica. Existe respeito entre nós, mas não somos uma comunidade, não temos um projecto comum.”¹ No entanto verifica-se como denominador comum às três etapas referidas – início do século XX, década de 60 e actualmente – a tónica nos critérios de flexibilidade e adaptabilidade para a actividade construtiva acrescentando-se, actualmente, a variável da questão ambiental. Acredito que as coberturas que me propus estudar são uma possibilidade de solução adequada ao contexto sócio-económico e ambiental que caracteriza a sociedade contemporânea. Pretendi fazer uma abordagem pragmática ao tema da construção temporária. Nesse sentido, com a componente técnica referenciada ao longo desta dissertação tentei sistematizar o conhecimento adquirido na categoria da construção cinética transportável. As estruturas móveis pré-fabricadas impulsionadas na etapa da industrialização marcaram a tendência para a crescente sistematização da actividade construtiva desta categoria: actualmente, a construção temporária conjuga os propósitos de emergência, lúdicos e didácticos contemplados ao longo das etapas cronológicas acima referidas, através de programas curatoriais de intervenção política, social e artística. As construções provisórias, leves e móveis contempladas

1. Rem Koolhaas, Abr|Mai|Jun 2012, Rui Furtado, o material tem sempre razão, *J.A.*, nº 245, pp. 59

desde a etapa da Pré-História revelam-se, nesse sentido, como uma estratégia lógica para intervenção em programas colectivos esporádicos ao ar livre que se pretendem adequar à condição de impermanência que essas actividades contemplam. Mas, com os exemplos do Palácio Spalato transformado em cidade ou o do Mercado de Braga reconvertido em escola de música, verifica-se que a impermanência não se manifesta apenas em programas temporários: a mutabilidade da realidade é um facto. A adaptação do construído à dinâmica da vida humana correspondeu a um percurso cronológico secular com especial incidência a partir do início do século XX, justificada pelo ritmo introduzido pelo processo da industrialização, período que apelou a soluções que permitissem maior liberdade na apropriação do espaço. No entanto a História tem demonstrado a resistência em fazer corresponder na disciplina de arquitectura esse estado natural de impermanência através da incorporação, no sistema construtivo, de componentes de variação formal. Apesar de nas manifestações teóricas e práticas do século XX se ter formulado com clareza a necessidade de uma arquitectura adaptável nesse sentido, este conhecimento não se traduziu consequentemente na prática com a intensidade esperada pelo facto de, em termos funcionais, se ter constatado que ao nível da habitação a incorporação de componentes que permitiam a alteração formal não resultou – apesar dos sistemas se terem relevado úteis para aplicação ao nível de equipamentos públicos, particularmente nas intervenções actuais em programas colectivos. Por último, destaco esta categoria de coberturas para uma intervenção actual mais consciente do ponto de vista ambiental e económico, pelas características de adaptação referidas.

5. bibliografia

5.1 referências impressas

ANTUNES, Luis Filipe Machado da Silva, *O futuro das cidades: a caminho da sustentabilidade*, Porto, FAUP, 2008

BAPTISTA, Luis Baptista, Novas Coletividades, a genealogia moderna do colectivo e as novas estratégias comunitárias, *ARQ| A: Novas Coletividades*, nº 107, Maio|Junho, 2013

BENYUS, Janine M. *Biomimicry : innovation inspired by nature*. Nova Iorque: Perennial, 2002

CAMPOS, Luis Pedro Sousa, *Sistemas e processos naturais: variação, mutação e evolução na arquitectura e arte dos últimos cinquenta anos*, Porto, FAUP, 2012

COOK, Peter. *Archigram*. Nova Iorque: Princeton Architectural Press, 1999.

COUCEIRO, Mauro, *Analogías biológicas en la arquitectura: del acercamiento biónico hacia los paradigmas de lo biodigital*, Barcelona, ESARQ – UIC, 2008

CRUZ, André, *Arquitectura biológica: uma análise da obra de Frei Otto*, Coimbra, FCTUC, 2012;

DUPAVILLON, Christian, *Architectures du cirque: des origins à nos jours*, Paris: Le Moniteur, 2001

FULLER, R B., Joachim Krausse, and Claude Lichtenstein. *Your private sky: R. Buckminster Fuller, the art of design science*. Baden: L. Müller, 1999.

FULLER, R B. and PAWLEY, Martin, *Buckminster Fuller*. Nova Iorque: Taplinger Pub. Co, 1990.

GERARDIN, Lucien, *La Biónica*, Madrid, Ediciones Guadamarra, 1968.

GIEDION, Sigfried. *Raum, Zeit, Architektur: die Entstehung einer neuen Tradition*. Basel u.a: Birkhäuser, 2000.

GIL, Pedro, *Análise e dimensionamento de uma estrutura de cobertura em membrana tensa*, Porto, FEUP, 2010.

GORDON, J. E., *The science of structures and materials*. Nova Iorque: Scientific American Library Distributed by Freeman, 1988.

GRUBER, Petra. *Biomimetics in architecture architecture of life and buildings*. Viena Nova Iorque: Springer, 2011.

HATJE, Gerd. *Diccionario ilustrado de la arquitectura contemporánea*. Barcelona: Gustavo Gili, 1979.

KRONENBURG, Robert, *Transportable environments: theory, context, design and technology*, Londres: Spon Press, 1998;

KRONENBURG, Robert, *Transportable environments 2: theory, context, design and technology*, Londres: Spon Press, 2003;

MONTANER, Josep Maria, *Depois do Movimento Moderno: arquitetura da segunda metade do século XX*, Barcelona: GG, 2001;

MONTANER, Josep Maria, *As formas do século XX*, Barcelona: Editorial GG, 2002;

MOREIRA, Renata Alexandra Sousa, *Novas possibilidades na arquitetura: reação, interação e inteligência*, Porto, FAUP, 2013;

MOREIRA, Rodrigo, *Utilização de membranas tensionadas leves na execução de estruturas especiais*, Porto, FEUP, 2008.

OLIVER, Paul. *Encyclopedia of vernacular architecture of the world*. Cambridge Nova Iorque, E.U.A: Cambridge University Press, 1997

OTTO, Frei, *Arquitectura adaptable*, Barcelona : Editorial Gustavo Gili, 1979

OTTO, Frei, RASCH, Bodo, *Finding form: towards an architecture of the minimal*, Stuttgart: Axel Menges, 1995.

OTTO, Frei, *Architecture et bionique: constructions naturelles*, Denges: Delta & Spes, 1985;

PACHECO, Pedro, *Soluções da natureza para problemas estruturais*, Porto, FEUP, 1993.

PEARCE, Peter. *Structure in nature is a strategy for design*. Cambridge: MIT Press, 1990.

PEREIRA, Inês Valadas Marques, *Arquitectura e biónica, narrativa da analogia na arquitetura*, Porto, FAUP, 2013

PORTOGHESI, Paolo, *Nature and architecture*, Milano: Skira, 2000;

PORTOGHESI, Paolo, *Arquitectura y naturaleza: arquetipos e semejanzas*, Valencia: Ediciones Generales de la Construcción, 2004;

PROCTOR, Noble S. and Patrick J. Lynch, *Manual of Ornithology : Avian Structure & Funcional*, New Haven, Yale University Press, 1993

PUENTE, Moisés, *Pabellones de exposición:100 años*, Barcelona: GG, 200,

ROHE, Ludwig, Phyllis Lambert, and Werner Oechslin. *Mies in America*. Montréal Nova Iorque: Canadian Centre for Architecture Whitney Museum of American Art Harry N. Abrams, Publishers, 2001

SANDAKER, Bjørn, EGGEN Arne, and CRUVELLIER Mark, *The structural basis of architecture*. London New York: Routledge, 2011

SCHUMACHER, Michael, *Move: architecture in motion, dynamic components and elements*, Basel, Birkhauser, 2010

THOMPSON, D'arcy and BONNER, John T., *On growth and form*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992

VELA, José León, *La arquitectura del 92: pabellones internacionales*, Sevilla, E.T.S.A.S., 1992

ZEVI, Bruno, *Towards an Organic Architecture*, Londres, Faber & Faber, 1950

5.2 referências electrónicas

ESCRIG, Félix, Cubiertas rígidas transformables, *Hormigón e acero* nº 193, Madrid, 1994, disponível em <http://pt.scribd.com/doc/56317433/1994-2-Cubiertas-rigidas-transformables>, acedido em 15 Fevereiro 2013

ESCRIG, Félix, Geometry of expandable space structures, *International Journal of space bar structures*, vol.8 n. 1/2, 1993, disponível em <http://pt.scribd.com/doc/56317279/1993-1-Geometry-of-Expandable-Space-Bar-Structures>, acedido em 15 Fevereiro 2013

ESCRIG, Félix, Juan Pérez Valcárcel, José Sánchez, La cubierta de la piscina de San Pablo de Sevilla, *Hormigon y acero* 1º trimestre, disponível em <http://pt.scribd.com/doc/56317467/1996-1-La-Cubierta-Desplegable-de-La-Piscina-San-Pablo-de-Sevilla> acedido em 22 Março 2013

GRUBER, Petra, *Biomimetics – materials, structures and processes, examples, ideas and case studies*, 2011, disponível em http://www.beck-shop.de/fachbuch/leseprobe/9783642119330_Excerpt_001.pdf acedido em 12 Janeiro 2013

HOBERMAN, Chuck, *Company profile and selected works: 1990-2012*, Hoberman Associates, 2012, disponível em <http://www.hoberman.com/HobermanPortfolio.pdf>

KRONENBURG, Robert, *Portable architecture: design and technology*. Basel Londres: Birkhäuser Springer distributor, 2008, disponível em <http://www.slideshare.net/ArqRicardoLopez1/portable-architecture> acedido em 9 Janeiro 2014

PELLEGRINO, Sergio, Unfolding of a potato flower as a deployable structure, *Deployable Structures and Bio Morphology*, Nova Iorque, E.U.A., 28-31 Maio, 2008, disponível em: <http://dspace.library.cornell.edu/handle/1813/11530>, acedido a 19 Abril 2013

PUERTAS DEL RIO, Lina, *Estructuras espaciales desmontables e despleables: Estudio de la obra de Emilio Pérez Piñero*, Madrid, 1990, disponível em http://oa.upm.es/15061/1/Lina_Puertas_del_Rio.pdf, acessado a 15 Março 2014.

TEMMERMAN, Niels de, *Design and Analysis of deployable bar structures for mobile architectural applications*, VRIJE, Bruxelas, 2007, disponível em http://homepages.vub.ac.be/~ndtemmer/Thesis_Niels_De_Temmerman.pdf, acessado a 2 Março 2014

TIBERT, Gunnar, *Deployable tensegrity structures for space applications*, Estocolmo, KTH, 2002, disponível em http://www.mech.kth.se/thesis/2002/phd/phd_2002_gunnar_tibert.pdf, acessado a 20 Janeiro 2014

WAN-TING, Chiu, SHANG-CHIA, Chiou, *Discussions on theories of bionic design*, Graduate school of design Doctoral Program, National Yunlin University of science and technology, (disponível em www.kaist.ac.kr)

5.3 referências de imagens

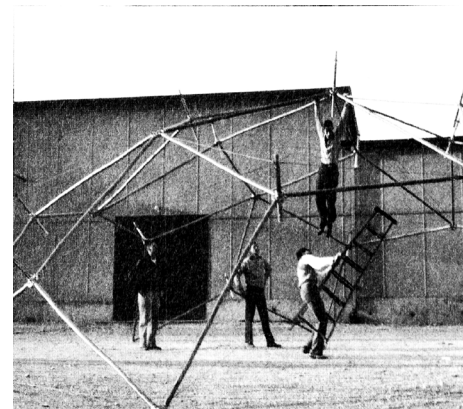
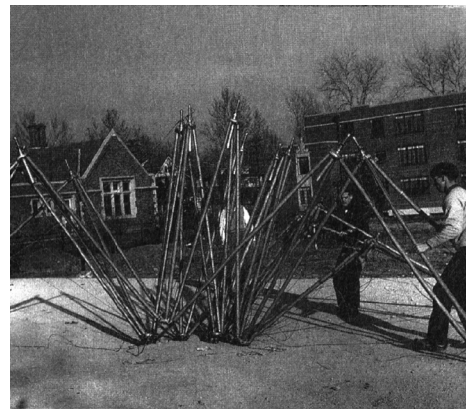
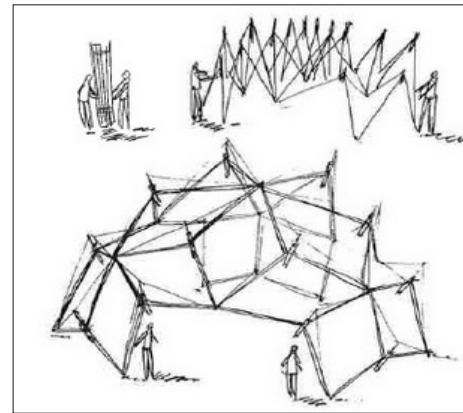
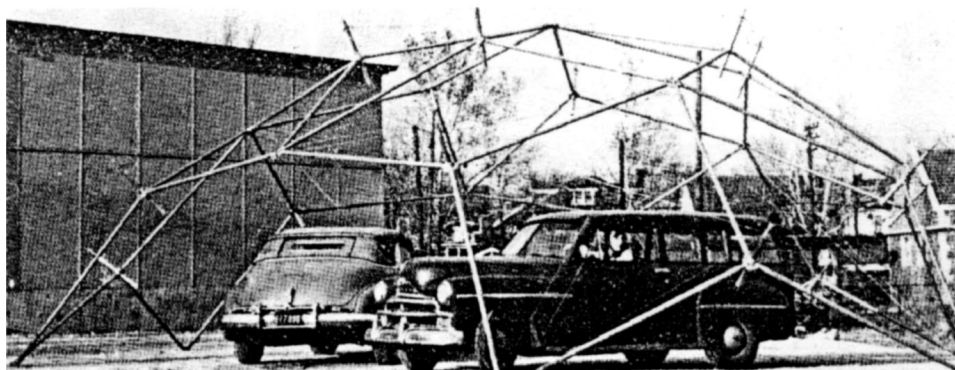
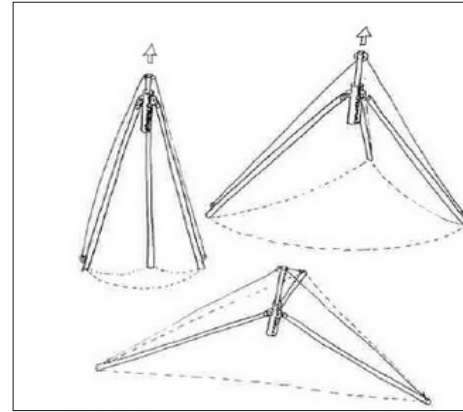
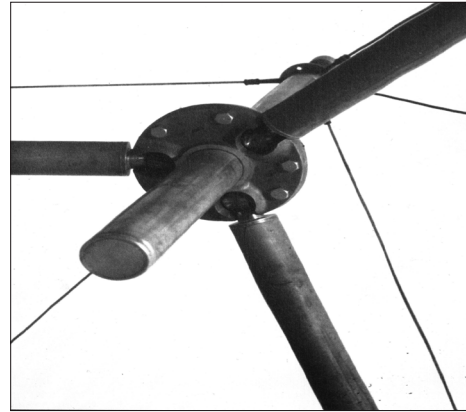
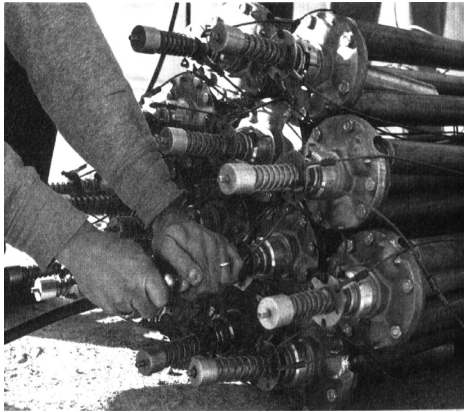
0. Frei Otto, *Arquitectura adaptable*, Barcelona : Editorial Gustavo Gili, 1979, pp. 228
- 1a. Idem, pp. 12
1. <http://naturalhomes.org/timeline/guyaju.htm>
2. Frei Otto, *Arquitectura adaptable*, Barcelona : Editorial Gustavo Gili, 1979, pp. 15
3. Idem, pp. 16
4. Idem, pp. 19
5. Idem, pp. 190
6. http://www.sl-rasch.de/p_175.html
7. <http://www.slideshare.net/ArqRicardoLopez1/portable-architecture>
8. <http://www.slideshare.net/ArqRicardoLopez1/portable-architecture>
9. <http://robkronenburg.wordpress.com/2012/07/09/hello-world/>
10. <http://12-efe.blogspot.pt/2009/04/o-palacio-de-cristal.html>
11. <http://miliasaskarquitetura.wordpress.com/tag/trelica-warren/>
12. http://www.joostdevree.nl/bouwkunde2/polonceau_spant.htm
13. <http://www.monet-giverny-normandy.com/gare-saint-lazare-monet/>
14. <http://www.lmc.ep.usp.br/people/hlinde/estruturas/cristal.htmw>
15. <http://www.archdaily.com/397949/ad-classic-the-crystal-palace-joseph-paxton/>
16. Frei Otto, *Arquitectura adaptable*, Barcelona : Editorial Gustavo Gili, 1979, pp. 242
17. Bjørn Sandaker, Arne Eggen, and Mark Cruvellier, *The structural basis of architecture*. London New York: Routledge, 2001
18. http://postaisportugal.canalblog.com/albums/region___porto/photos/1230979-may22470.html
19. <http://www.planetarium-jena.de/geschichte.43.0.html>
20. R B. Fuller and Martin Pawley, *Buckminster Fuller*. Nova Iorque: Taplinger Pub. Co, 1990, pp. 124
21. Idem, pp. 145
22. <http://spaceframestructures.tumblr.com/post/58138848784/konrad-wachsmann-system-for-constructing-large>
23. <http://miscellaneous-pics.blogspot.pt/2010/10/konrad-wachsmann.html>
24. <http://miscellaneous-pics.blogspot.pt/2010/10/konrad-wachsmann.html>
25. <http://dprbcn.wordpress.com/2010/01/29/konrad-wachsmann/>
26. Sabine Lebesque, and Helene Vlissingen. *Yona Friedman: structures serving the unpredictable*. Rotterdam: NAI Publishers,
27. R B. Fuller, Joachim Krausse, and Claude Lichtenstein. *Your private sky: R. Buckminster Fuller*. Baden: L. Müller, 1999,
28. Idem, pp. 373
29. <http://www.pencil.com/gallery1.php?show=7204&p=699619861169>
30. <http://indayear2studio-1314s1.blogspot.pt/2013/09/jets-case-study-instant-cities-archigram.html>
31. <http://robkronenburg.wordpress.com/2012/07/09/hello-world/>
32. <http://robkronenburg.wordpress.com/2012/07/09/hello-world/>
33. <http://robkronenburg.wordpress.com/2012/07/09/hello-world/>
34. <http://robkronenburg.wordpress.com/2012/07/09/hello-world/>
35. <http://robkronenburg.wordpress.com/2012/07/09/hello-world/>
36. <http://robkronenburg.wordpress.com/2012/07/09/hello-world/>
37. <http://robkronenburg.wordpress.com/2012/07/09/hello-world/>
38. <http://robkronenburg.wordpress.com/2012/07/09/hello-world/>
39. <http://robkronenburg.wordpress.com/2012/07/09/hello-world/>
40. <http://robkronenburg.wordpress.com/2012/07/09/hello-world/>
41. <http://robkronenburg.wordpress.com/2012/07/09/hello-world/>
42. http://dominicus.malleotus.free.fr/croatie/lang_fr/ville_split_-_palais_diocletien.htm
43. http://dominicus.malleotus.free.fr/croatie/lang_fr/ville_split_-_palais_diocletien.htm

44. http://clientes.netvisao.pt/mmorfose/caso_mercado_pagina7a.html
45. fornecido pelo escritório do arquitecto Eduardo Souto Moura
46. Frei Otto, *Arquitectura adaptable*, Barcelona : Editorial Gustavo Gili, 1979, pp. 29
47. http://jvillavisencio.blogspot.pt/2010_11_01_archive.html
48. <http://www.studyblue.com/notes/n/mies-in-germany-feb-22/deck/2337986>
49. <http://www2.eng.cam.ac.uk/~sdg/dstruct/ssda.html>
50. Michael Schumacher, *Move: architecture in motion, dynamic components and elements*, Basel, Birkhauser, 2010, pp. 56
51. Ibidem
52. Michael Schumacher, *Move: architecture in motion, dynamic components and elements*, Basel, Birkhauser, 2010, pp. 56
53. <http://robkronenburg.wordpress.com/2012/07/09/hello-world/>
54. <http://pt.scribd.com/doc/56317433/1994-2-Cubiertas-rigidas-transformables>
55. montagem da autora, retirado de: Frei Otto, *Arquitectura adaptable*, Barcelona : Editorial Gustavo Gili, 1979, pp. 228.
56. <http://buttercupia.blogspot.pt/2012/02/saying-goodbye-to-pittsburgh-icon.html>
57. <http://web-japan.org/atlas/architecture/arc24.html>
58. http://www.sl-rasch.de/p_035-2.html
- 58.a. http://www.sl-rasch.de/p_035-2.html
59. Michael Schumacher, *Move: architecture in motion, dynamic components and elements*, Basel, Birkhauser, 2010, pp. 198
60. Idem, pp. 36
61. Philip Jodidio, and Santiago Calatrava. Santiago Calatrava. Köln New York: Taschen, 1998, pp. 123
62. <http://robkronenburg.wordpress.com/2012/07/09/hello-world/>
63. Michael Schumacher, *Move: architecture in motion, dynamic components and elements*, Basel, Birkhauser, 2010, pp. 164
64. <http://www.tensinet.com/database/viewProject/3807.html>
65. <http://www.hoberman.com/HobermanPortfolio.pdf>
66. <http://www.bestourism.com/items/di/1385?title=Qi-Zhong-stadium-in-Shanghai&b=211>
67. Michael Schumacher, *Move: architecture in motion, dynamic components and elements*, Basel, Birkhauser, 2010, pp. 134
68. http://homepages.vub.ac.be/~ndtemmer/Thesis_Niels_De_Temmerman.pdf
69. Michael Schumacher, *Move: architecture in motion, dynamic components and elements*, Basel, Birkhauser, 2010, pp. 40
70. <http://www.hoberman.com/HobermanPortfolio.pdf>
71. <http://www.hoberman.com/HobermanPortfolio.pdf>
72. <http://patentados.com/invento/pantografo-de-estabilizacion-para-una-cubierta-protectora.html>
73. <http://pt.scribd.com/doc/56317279/1993-1-Geometry-of-Expandable-Space-Bar-Structures>
74. <http://pt.scribd.com/doc/56317467/1996-1-La-Cubierta-Desplegable-de-La-Piscina-San-Pablo-de-Sevilla>
75. http://www.sl-rasch.de/p_184.html
76. http://www.sl-rasch.de/p_1047.html
77. http://www.sl-rasch.de/p_072.html
78. http://www.sl-rasch.de/p_1174.html
79. <http://www.dataisnature.com/?p=1789>
80. <http://arqteoria.wordpress.com/2013/09/12/aula-3-posmodernismo-i-usa/>
81. <http://en.japantravel.com/photos/sunset-and-lights-in-meriken-park>
82. <http://www.tdrinc.com/reyes.html>
83. Paolo Portoghesi, *Nature and architecture*, Milano: Skira, 2000, pp. 94
84. <http://www.lmc.ep.usp.br/people/hlinde/Estruturas/ur.htm>
85. Paolo Portoghesi, *Nature and architecture*, Milano: Skira, 2000, pp. 129
86. Idem, pp. 226
87. Ibidem
88. Bjørn Sandaker, Arne Eggen, and Mark Cruvellier, *The structural basis of architecture*. London New York:
89. Ibidem
90. <http://atmosphericfront.wordpress.com/2011/10/30/gaudi-catenary-curves-and-other-sources-of-inspiration/>

91. <http://www.archdaily.com/397949/ad-classic-the-crystal-palace-joseph-paxton/>
92. <http://nybg.tumblr.com/post/47023958252/victoria-amazonica-has-been-a-long-running>
93. <http://www.publicdomainpictures.net/view-image.php?image=25113&picture=estrutura-de-asa-de-inseto&jazyk=PT>
94. http://www.etsavega.net/dibex/Boullée_Newton-e.htm
95. http://br.photaki.com/picture-basilica-de-santa-sofia-istambul_31666.htm
96. Farshid Moussavi and Daniel Lopez. *The function of form*. Barcelona New York Cambridge, Mass: Actar Harvard
97. R B. Fuller, Joachim Krausse, and Claude Lichtenstein. *Your private sky: R. Buckminster Fuller*. Baden: L. Müller, 1999,
98. R B. Fuller and Martin Pawley, *Buckminster Fuller*. Nova Iorque: Taplinger Pub. Co, 1990, pp. 167
99. [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Radiolaria_\(Challenger\)_Plate_135.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Radiolaria_(Challenger)_Plate_135.jpg)
100. <http://www.dreamstime.com/royalty-free-stock-photography-buckminster-fuller-s-geodesic-dome-image9314077>
101. D'arcy Thomson and John T. Bonner, *On growth and form*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992, pp. 67
102. <http://www.winsornewton.com/resource-centre/product-articles/josef-albers-article-part-two/>
103. Bjørn Sandaker, Arne Eggen, and Mark Cruvellier, *The structural basis of architecture*. London New York: Routledge,
104. André Cruz, *Arquitetura biológica: uma análise da obra de Frei Otto*, Coimbra, FCTUC, 2012, pp. 185
105. <http://riunet.upv.es/handle/10251/2346>
106. http://www.sl-rasch.de/p_1014.html
107. <http://memorandu.blogspot.pt/2006/07/frei-otto.html>
108. <http://www.lmc.ep.usp.br/people/hlinde/estruturas/munique.htm>
109. Paolo Portoghesi, *Nature and architecture*, Milano: Skira, 2000, pp. 259
110. <http://coisasdaarquitectura.wordpress.com/2012/06/03/os-pilares-de-mies/>
111. http://sanbiomedica.blogspot.pt/2010_10_01_archive.htmlw
112. desenho da autora
113. <http://www.cbca-acobrasil.org.br/artigos-tecnicos-ler.php?cod=5747>
114. <http://www.uh.edu/engines/epi2586.htm>
115. <http://dspace.library.cornell.edu/handle/1813/11530>
116. <http://nature-explorations.com/galleries/pattern-and-design-in-nature/>
117. http://www.mech.kth.se/thesis/2002/phd/phd_2002_gunnar_tibert.pdf
118. <http://g1.globo.com/ceara/noticia/2014/05/inspiracao-para-o-fuleco-tatu-bola-ganha-plano-de-preservacao-no-ceara.html>
119. http://www.pbase.com/tmurray74/pill_bugs_armadillidiidae
120. http://www.beck-shop.de/fachbuch/leseprobe/9783642119330_Excerpt_001.pdf
121. <http://www.heatherwick.com/rolling-bridge/>
122. <http://www.colegiosacramentinas.com.br/europa/?p=3600>
123. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1467803900000256>
124. <http://www.cem.ufpr.br/litoralnotacem/guia/guiaaves.htm>
125. Renata Moreira Alexandra Sousa, *Novas possibilidades na arquitetura: reação, interação e inteligência*, Porto, FAUP,
126. Michael Schumacher, *Move: architecture in motion, dynamic components and elements*, Basel, Birkhauser, 2010, pp. 178
127. tabela feita pela autora
128. <http://pt.scribd.com/doc/56317433/1994-2-Cubiertas-rigidas-transformables>
129. http://br.freepik.com/fotos-gratis/guarda-chuva-bangasa-cha-japao_668096.htm
130. <http://pt.scribd.com/doc/56317433/1994-2-Cubiertas-rigidas-transformables>
131. <http://pt.scribd.com/doc/56317433/1994-2-Cubiertas-rigidas-transformables>
132. R B. Fuller, Joachim Krausse, and Claude Lichtenstein. *Your private sky: R. Buckminster Fuller*. Baden: L. Müller, 1999,
133. <http://archikey.com/building/read/2851/Tanzbrunnen/866/>
134. <http://pt.scribd.com/doc/56317433/1994-2-Cubiertas-rigidas-transformables>
135. <http://pt.scribd.com/doc/56317433/1994-2-Cubiertas-rigidas-transformables>
136. http://www.sl-rasch.de/p_schlossplatz.html
137. http://www.sl-rasch.de/p_schlossplatz.html
138. <http://www.ufrgs.br/espmat/disciplinas/geotri/moduloII/recursos29.html>

139. <http://patentados.com/invento/pantografo-de-estabilizacion-para-una-cubierta-protectora.html>
140. <http://web.mat.bham.ac.uk/C.J.Sangwin/howroundcom/linkages/>
141. <http://www.cem.ufpr.br/litoralnotacem/guia/guiaaves.htm>
142. Niels de Temmerman, *Design and Analysis of deployable bar structures for mobile architectural applications*, VRIJE,
143. Idem, pp. 11
144. Idem, pp. 12
145. Idem, pp. 13
146. Idem, pp. 150
147. Idem, pp. 21
148. Idem, pp. 22
149. Lina Puertas del Río, *Estructuras espaciales desmontables e despleables: Estudio de la obra de Emilio Pérez Piñero*,
150. Idem, pp. 377
151. Idem, pp. 24
152. <http://www.espaciopatico.com/2012/12/emilio-perez-pinero-en-el-coamu/>
153. Niels de Temmerman, *Design and Analysis of deployable bar structures for mobile architectural applications*, VRIJE,
154. Lina Puertas del Río, *Estructuras espaciales desmontables e despleables: Estudio de la obra de Emilio Pérez Piñero*,
155. <http://pt.scribd.com/doc/56317433/1994-2-Cubiertas-rigidas-transformables>
156. Niels de Temmerman, *Design and Analysis of deployable bar structures for mobile architectural applications*, VRIJE,
157. Lina Puertas del Río, *Estructuras espaciales desmontables e despleables: Estudio de la obra de Emilio Pérez Piñero*,
158. Idem, pp. 268
159. <http://pt.scribd.com/doc/56317467/1996-1-La-Cubierta-Desplegable-de-La-Piscina-San-Pablo-de-Sevilla>
160. <http://pt.scribd.com/doc/56317467/1996-1-La-Cubierta-Desplegable-de-La-Piscina-San-Pablo-de-Sevilla>
161. <http://pt.scribd.com/doc/56317467/1996-1-La-Cubierta-Desplegable-de-La-Piscina-San-Pablo-de-Sevilla>
162. <http://pt.scribd.com/doc/51524879/1987-1-Estructuras-Espaciales-Desplegables-Curvas>
163. Niels de Temmerman, *Design and Analysis of deployable bar structures for mobile architectural applications*, VRIJE,
164. Ibidem;
165. <http://www.hoberman.com/HobermanPortfolio.pdf>
166. <http://www.hoberman.com/HobermanPortfolio.pdf>
167. <http://www.hoberman.com/HobermanPortfolio.pdf>

6. anexos



OBRA | LOCAL | ANO | AUTOR

Flying Seedpod, Universidade de Washington, 1953, Buckminster Fuller.

DIMENSÃO | ÁREA DE SUPERFÍCIE

peças lineares de 2,5m comprimento

10m de diâmetro

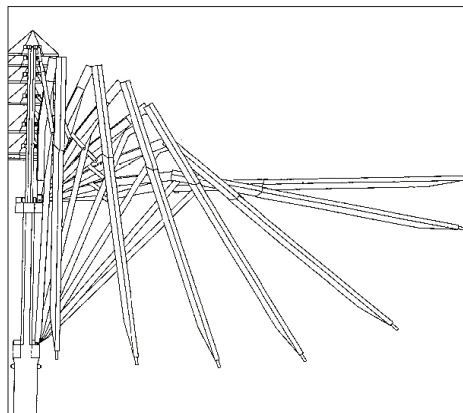
SISTEMA CONSTRUTIVO E CINÉTICO

Estrutura constituída por 15 módulos de 3 peças articuladas através de um mastro pequeno no topo de cada grupo de peças. O mastro é empurrado para fora automaticamente através da força motriz de ar comprimido: o mastro corresponde a um pistão - peça que se move num corpo cilíndrico por pressão de um fluido, neste caso gás.

Cada pistão tem três elementos à tracção - tirantes de aço - ligados às respectivas bases do tripé. Como são expandidos através de uma pressão de gás elevada os elementos à tracção puxam as bases do tripé para fora num sistema de forças "acção-reacção".

Segundo Fuller, a estrutura é complementada por uma rede de cabos numa configuração de "estrela regular geodésica", rede esférica que restringe o movimento dos apoios da estrutura, aumentando a estabilidade do sistema geral.

Todos os membros estruturais são firmemente agrupados em paralelo com o objectivo de a estrutura ser transportada ocupando o mínimo de volume dentro de uma cápsula rígida.



OBRA | LOCAL | ANO | AUTOR

protótipos de sistemas fotovoltaicos,
Arábia Saudita, 1987, Frei Otto

DIMENSÃO | ÁREA DE SUPERFÍCIE

5 x 5m; 25m²

altura: 6.80m (fechada); 5.50m (aberta)

SISTEMA CONSTRUTIVO E CINÉTICO

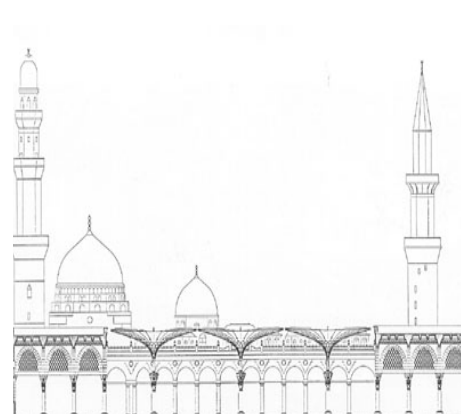
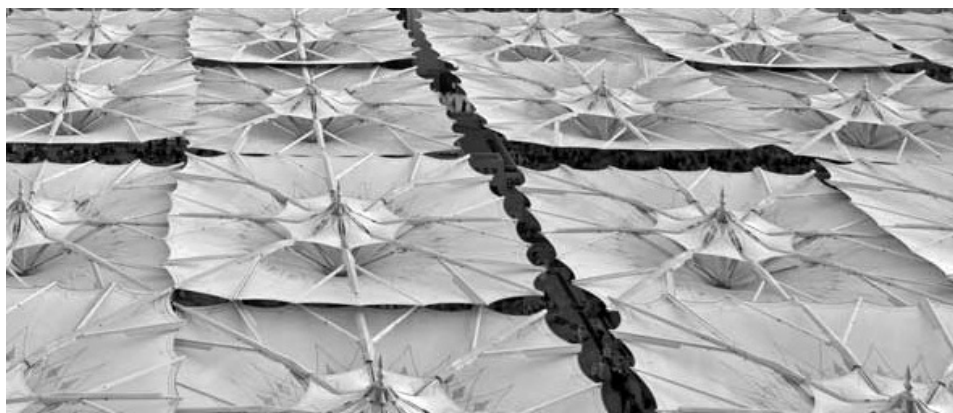
12 painéis fotovoltaicos

tempo de abertura: 50 segundos

sistema de controlo automatizado

Requisitos de uma estrutura que se abra e recolha de forma imediata em circunstâncias de velocidade de vento superiores a 12m/seg, detectada através de um sistema de controlo automático. Nesse sentido testam-se em campo - ao longo da costa do mar Vermelho - soluções submetidas a condições climáticas reais.

São executados 24 protótipos construídos em 8 meses durante 1987 e testados até Abril de 1989 para aplicação em edifícios na Arábia Saudita.



OBRA | LOCAL | ANO | AUTOR

Umbrellas for the Courts of Prophet's Holy Mosque, Medina, Arábia Saudita, 1992, Frei Otto

DIMENSÃO | ÁREA DE SUPERFÍCIE

altura: 19m (fechado); 14m (aberto)

17x18m; 300m² (unidade); 3700m² (total)

SISTEMA CONSTRUTIVO E CINÉTICO

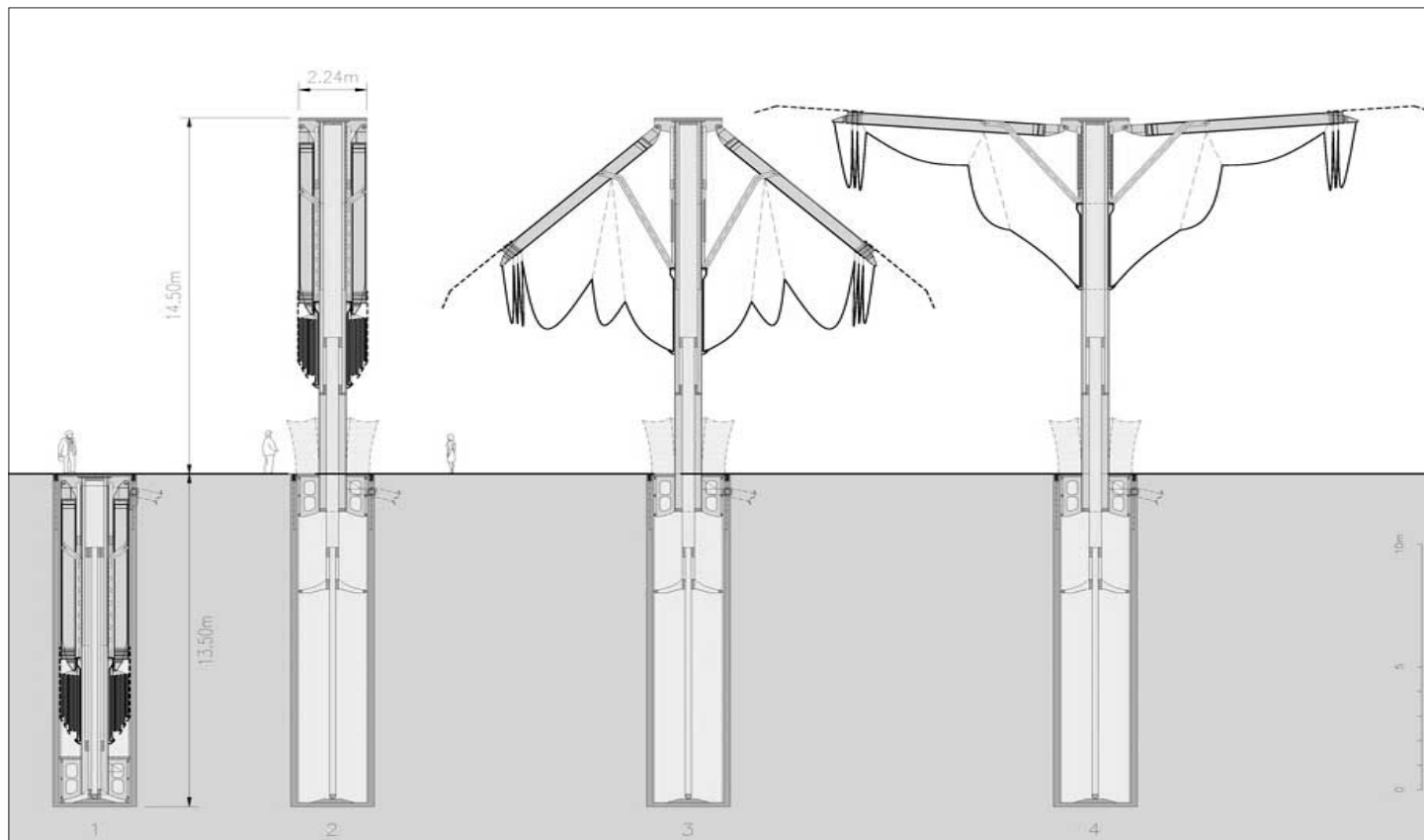
peso: 10 toneladas

tempo de abertura: 90 segundos

Estrutura em ferro constituída por um mastro central com peças rígidas articuladas triforcadas, que suportam a membrana. O mastro é oco para escoamento de águas. A estrutura no seu conjunto tem 20 braços: 4 de maior calibre que correspondem às diagonais e mediatrizes do quadrado que configura a membrana, e 16 de menor calibre suportados nos principais que maximizam a estabilidade da membrana. Os braços são expandidos e recolhidos segundo sistema hidráulico de automação alimentado a painéis fotovoltaicos. São 12 coberturas aplicadas com o propósito de cobrir pátios interiores da mesquita com 2000m² para resolver questões de climatização de forma passiva. As coberturas abrem e fecham de acordo com a posição do sol. No Verão fornecem sombra a locais que atingem os 50° C. No Inverno as coberturas são abertas à noite com o propósito de manter no recinto do pátio o calor/radiação do dia. É uma solução que conduz à possibilidade de poupança de energia, através do controlo da luz natural e da temperatura interna.

processo de montagem: *Umbrellas for the Courts of Prophet's Holy Mosque*, Medina, 1992, Frei Otto





OBRA | LOCAL | ANO | AUTOR

Umbrellas for the Schlossplatz, Stuttgart, Alemanha, 2004, Frei Otto

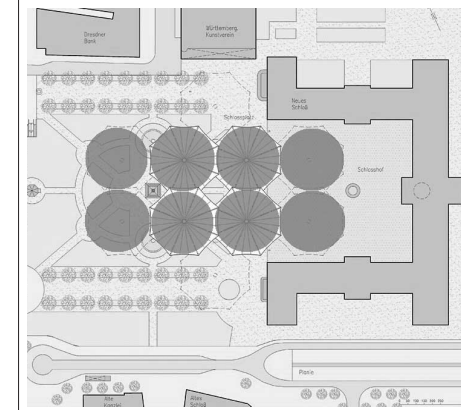
DIMENSÃO | ÁREA DE SUPERFÍCIE

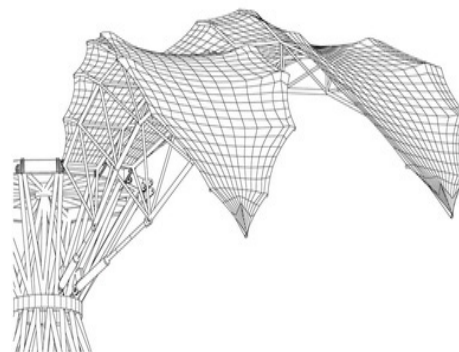
altura: 19m (fechada); 15m (aberta)
1600m² por unidade; 6000m² no total

SISTEMA CONSTRUTIVO E CINÉTICO

tempo de abertura: 5 minutos

Cobertura em membrana que vence vão de 46m. Estrutura em ferro constituída por um mastro central com peças rígidas articuladas triforcadas, que suportam a membrana. O mastro é oco para escoamento de águas. A estrutura no seu conjunto tem 20 braços: 4 de maior calibre que correspondem às diagonais e mediatrizes do quadrado que configura a membrana, e 16 de menor calibre suportados nos principais que maximizam a estabilidade da membrana. Solução de apoio a local associado a eventos lúdicos com concentração de cerca de 70 000 pessoas.





OBRA | LOCAL | ANO | AUTOR

Venezuela Pavilion, Exposição Internacional *Millennium World*, Alemanha, 2000, Frei Otto e Fruto Vivas

DIMENSÃO | ÁREA DE SUPERFÍCIE

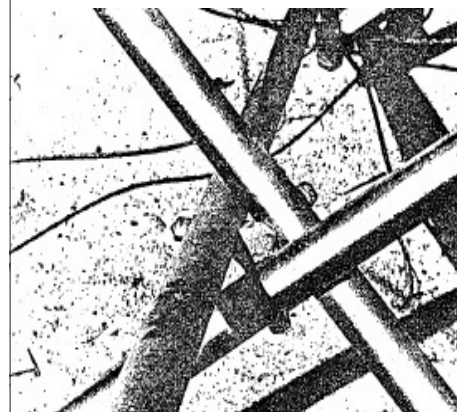
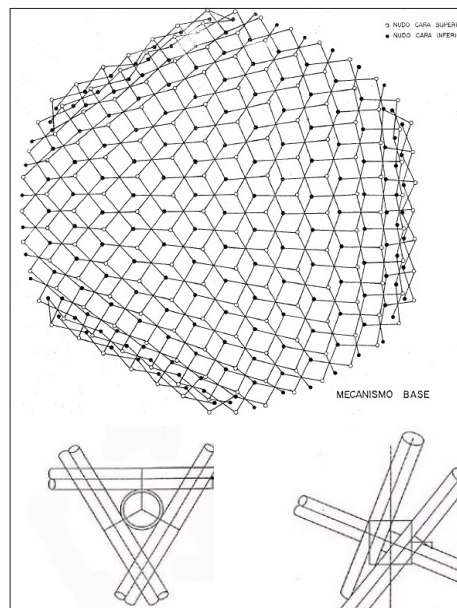
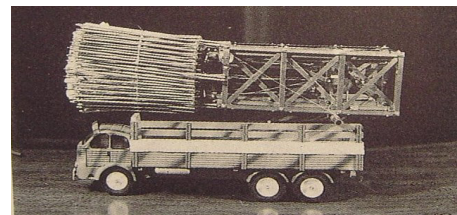
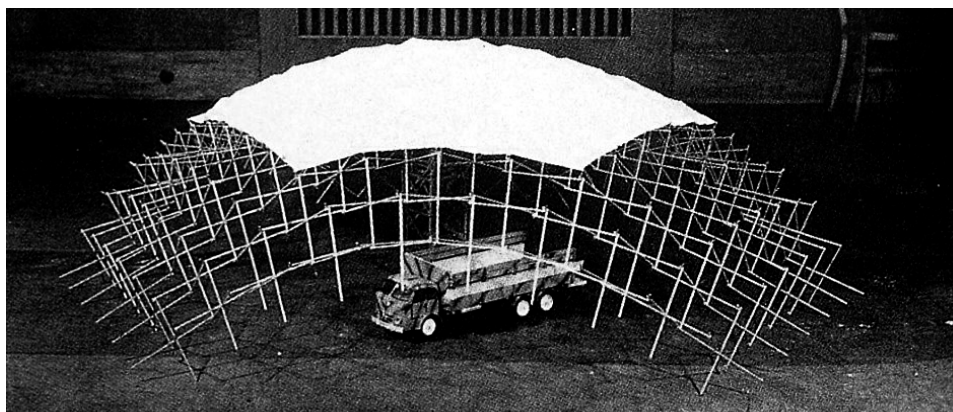
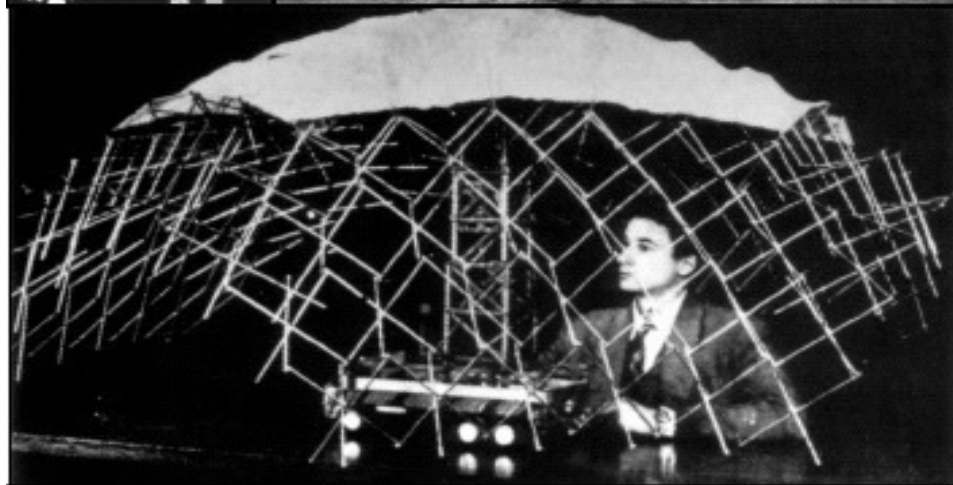
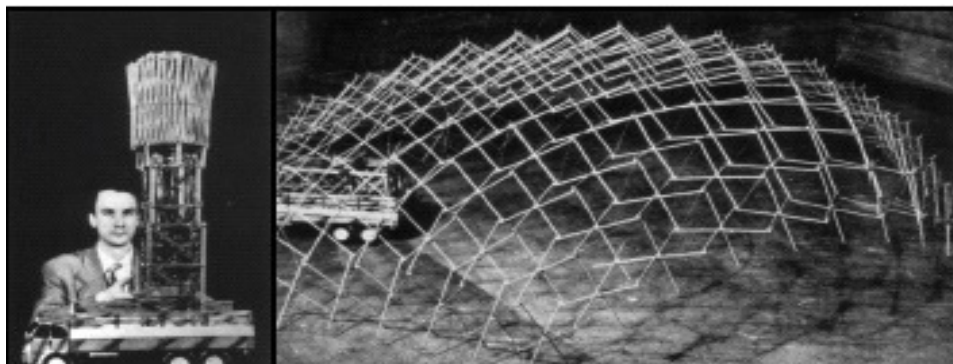
diâmetro: 30m (fechada); 40 m (aberta)

altura: 18m; 1500m² área de superfície

SISTEMA CONSTRUTIVO E CINÉTICO

Sistema “guarda-chuva”. Cobertura que abre e fecha através de sistema hidráulico. Peças treliçadas dispostas de forma radial a duas cotas distintas em torno de um mastro central, insinuando a forma de uma palmeira.

A posição da cobertura relaciona-se com a amplitude permitida pelo mecanismo de movimento associado, sendo constituída por 16 peças rígidas treliçadas – cada uma com 10m de comprimento. Do ponto de vista técnico assemelha-se ao sistema “guarda-chuva” comum mas com os movimentos opostos.



OBRA | LOCAL | ANO | AUTOR

proposta universitária, *Teatro Ambulante para 500 espectadores*, Madrid, 1961
Emílio Pérez Piñero

DIMENSÃO | ÁREA DE SUPERFÍCIE

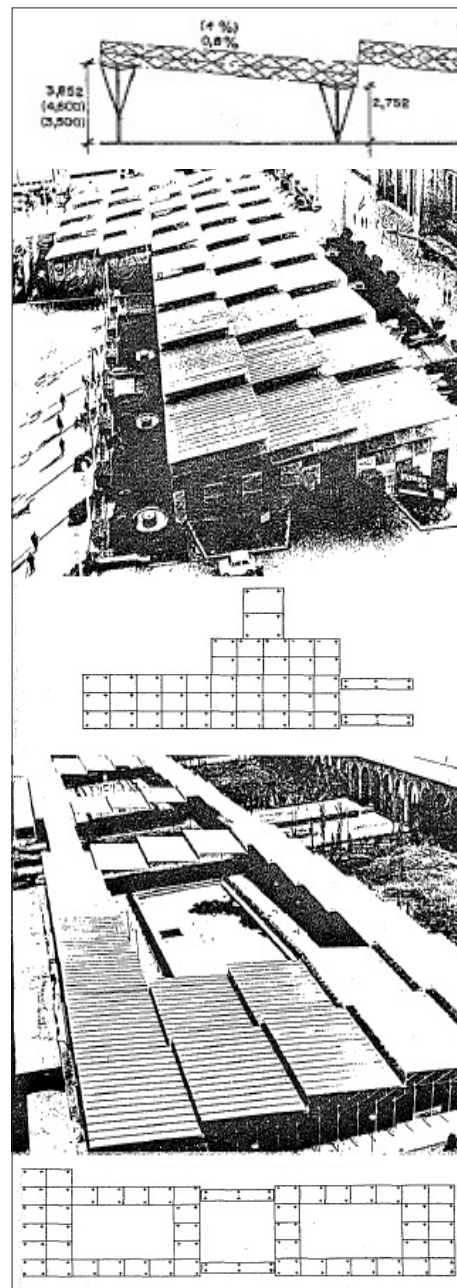
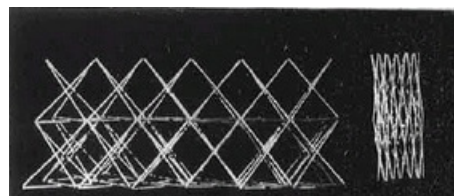
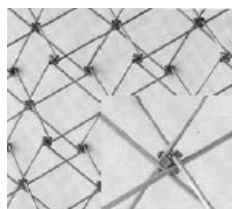
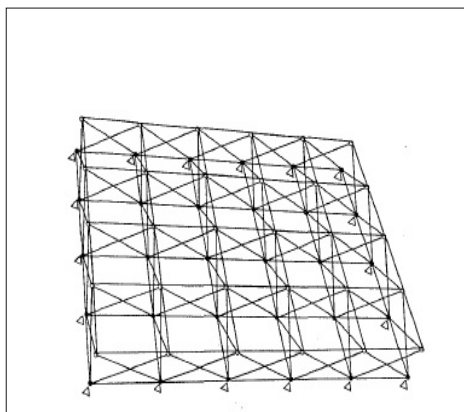
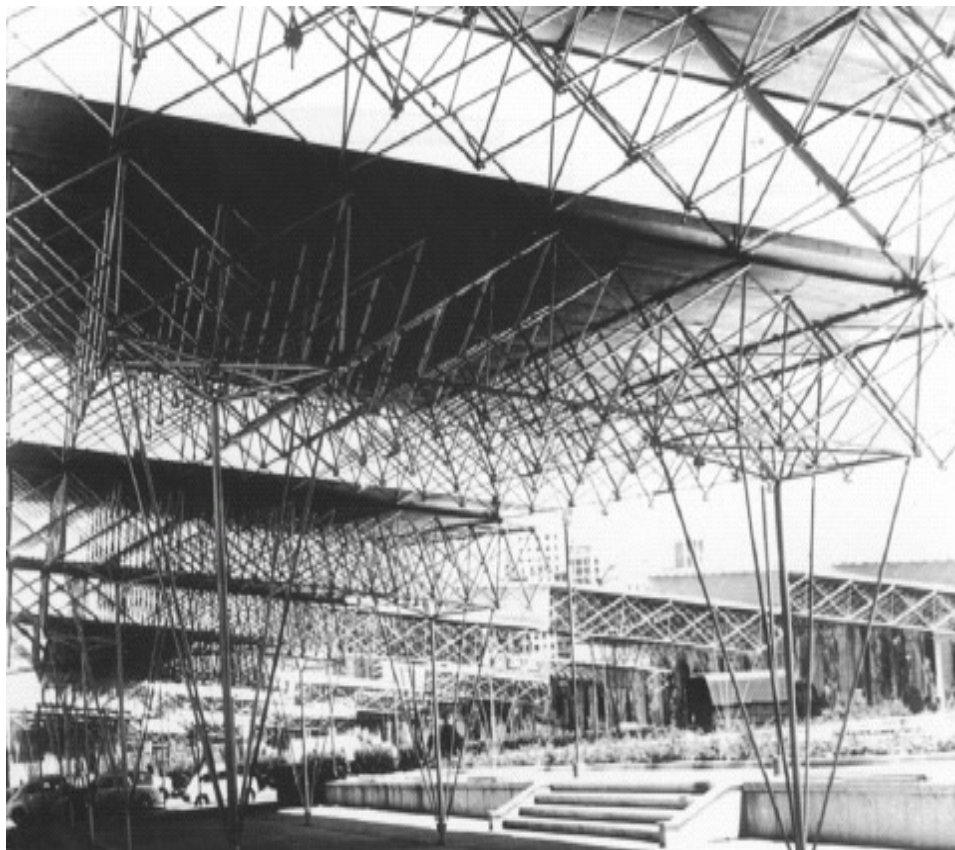
32m de diâmetro e 11m de altura
3 toneladas de peso

SISTEMA CONSTRUTIVO E CINÉTICO

Cúpula de peças rígidas lineares metálicas em forma de rede “tipo pantógrafo” de dupla camada, que para facilitar as questões logísticas de transporte é uma estrutura que tem a capacidade de ser transportada compactada enquanto peça única, e expandir-se facilmente desde o camião que a transporta. Contempla a possibilidade de incorporar uma lona, que se fixava aos nós da estrutura.

Os cabos das superfícies interior e exterior têm o mesmo comprimento, possibilitando não só a rotação das peças tubulares desde que estão juntas – recolhidas – até à sua abertura máxima – expandida como também a definição da curvatura da estrutura.

Pelo âmbito do concurso não abordou todos os problemas inerentes a um projecto real, nomeadamente os tipos de apoio, resistência das peças que formam as articulações para vencer vãos e esforços reais, preocupando-se mais na definição do sistema reticulado e no seu funcionamento.



OBRA | LOCAL | ANO | AUTOR

Pabellon Transportable para Exposiciones, Madrid e Barcelona, 1964, Emilio Pérez Piñero

DIMENSÃO | ÁREA DE SUPERFÍCIE

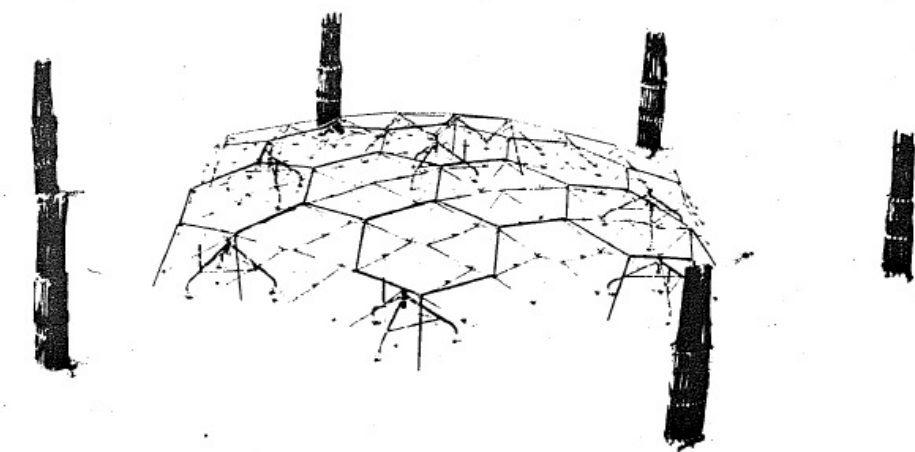
8000 m² área de superfície total módulos: 0,80 x 0,70m (recolhidos) 12 x 9m (expandidos)

SISTEMA CONSTRUTIVO E CINÉTICO

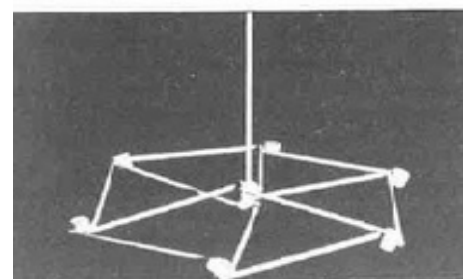
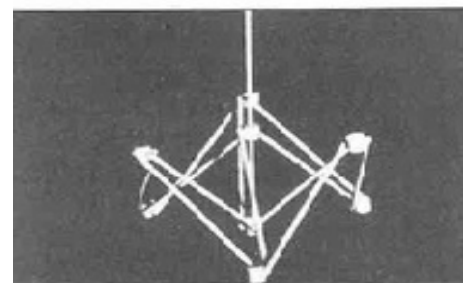
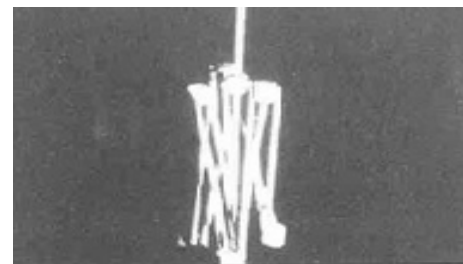
Estrutura plana constituída por módulos de 4 peças articuladas num ponto intermédio comum, revestida a placas de alumínio. É uma solução modular que permite várias disposições dos módulos que configuram diferentes geometrias da cobertura, como se vê nas plantas.

Requisitos práticos de se adaptar às características físicas dos distintos locais de instalação, e ser facilmente montável desmontável e transportável, pelo tempo escasso para a própria implantação. A imagem ao lado mostra os mesmos módulos com configurações diferentes, em cima na exposição em Barcelona, em baixo em Madrid.

É a primeira proposta real do arquitecto.



PARTES COMPONENTES DEL MODELO



OBRA | LOCAL | ANO | AUTOR

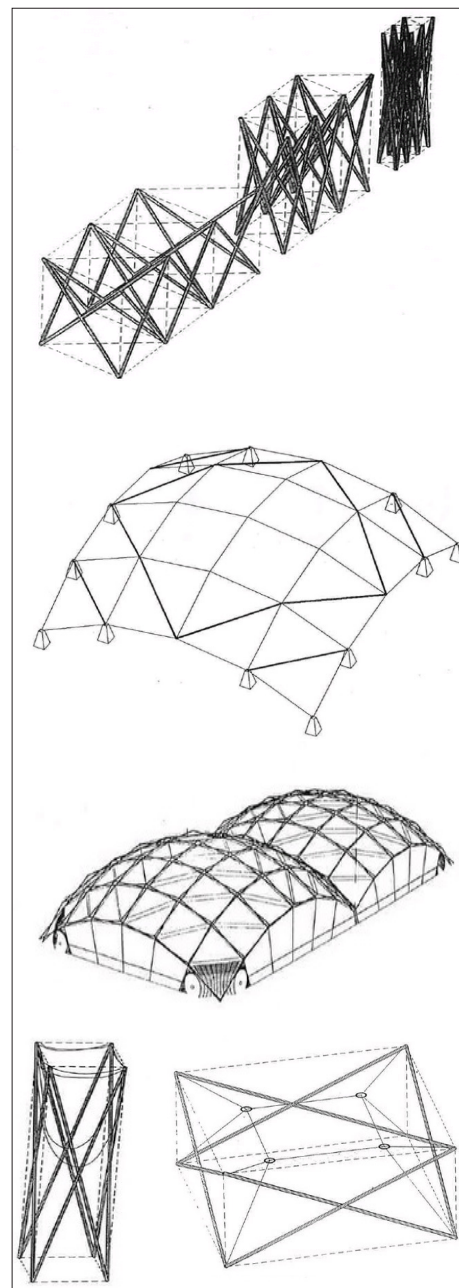
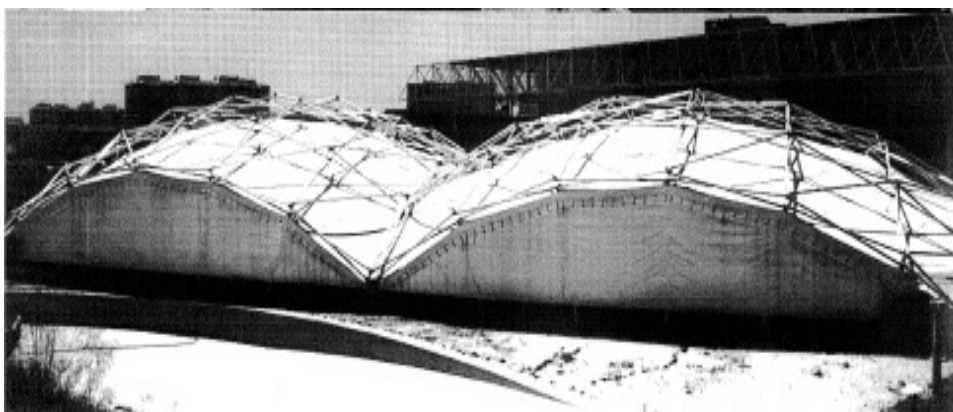
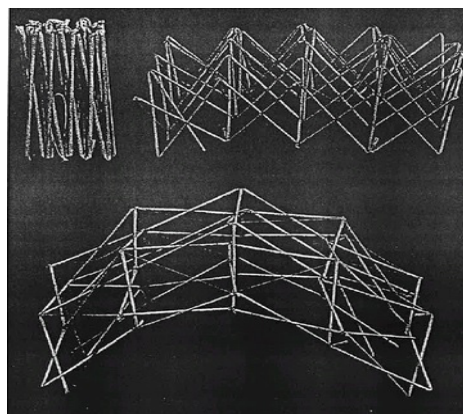
protótipo, *Cúpula Desplegable para grandes Luces*, 1966, Emilio Pérez Piñero

DIMENSÃO | ÁREA DE SUPERFÍCIE

60m diâmetro

SISTEMA CONSTRUTIVO E CINÉTICO

O ano provável de execução deste sistema é em 1966 pelo facto de o ter apresentado na Conferência Internacional sobre estruturas tridimensionais, ocorrida em Londres em Setembro de 1966. É um modelo de estudo para o ensaio de soluções relacionadas com o movimento das articulações para estruturas que pretendam o alcance de vãos de grandes dimensões. É um protótipo com 20m de diâmetro executado para comprovar as suas características quando transpostas para a construção de uma cúpula com 60m de diâmetro. O modelo é formado por sete partes – seis periféricas e uma central – executadas em separado, formando unidades compactadas distintas, que se montam unindo os nós comuns para formar a cúpula. Segundo o arquitecto uma cúpula de 60m de diâmetro correspondente a uma só unidade modular seria inviável: não manejável e instável. O mecanismo base, composto por pirâmides duplas de base triangular, ordena-se de forma em que no plano dos apoios os vértices comuns – ou seja, ponto de articulação das peças lineares em “x” – forma uma rede equilátera contida num triângulo de icosaedro.



OBRA | LOCAL | ANO | AUTOR

Cubierta Desplegable de la Piscina San Pablo de Sevilla, Sevilla, 1996, Félix Escrig

DIMENSÃO | ÁREA DE SUPERFÍCIE

duas coberturas de 30 x 30m; altura 8m

1800m² (expandida); 30m² (recolhida)

SISTEMA CONSTRUTIVO E CINÉTICO

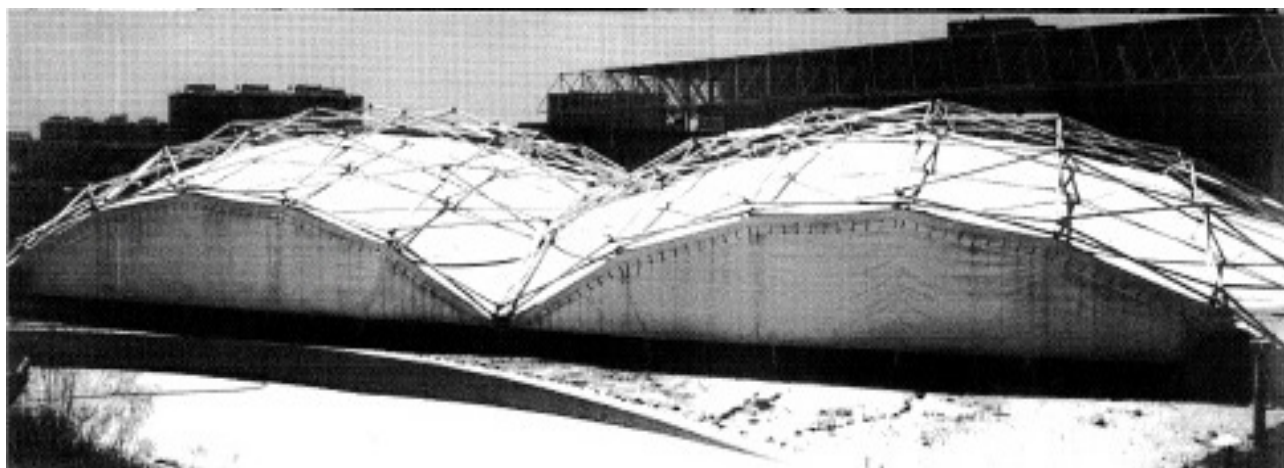
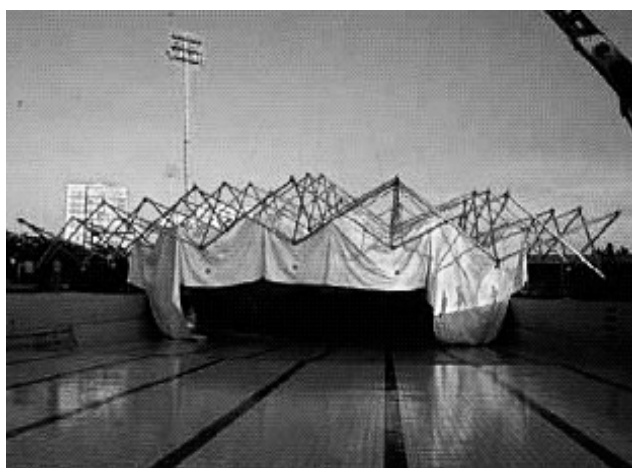
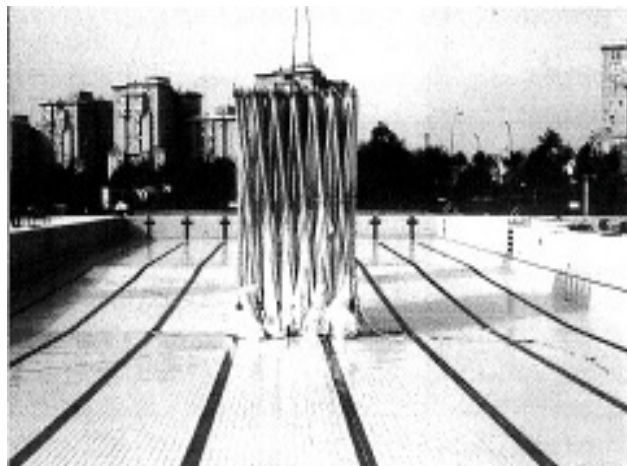
A malha da estrutura é constituída por elementos pantógrafos de 6m cruzados perpendicularmente, sistema que permite armazenamento eficaz. Sistema que permite articular várias coberturas entre si e obter áreas de superfície maiores a partir de coberturas mais reduzidas.

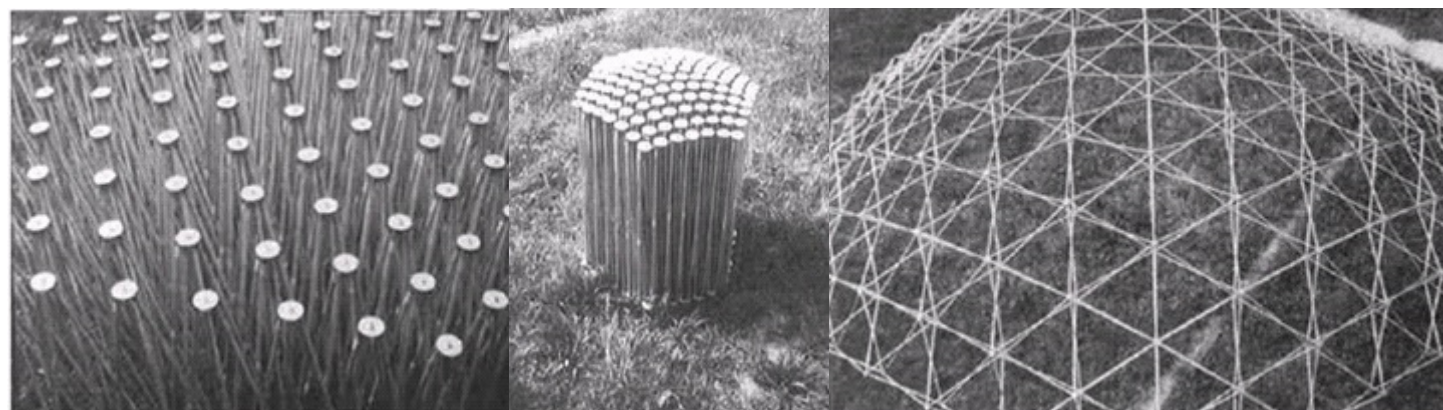
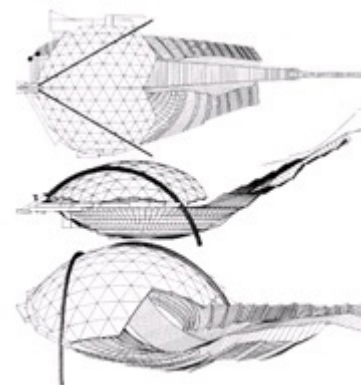
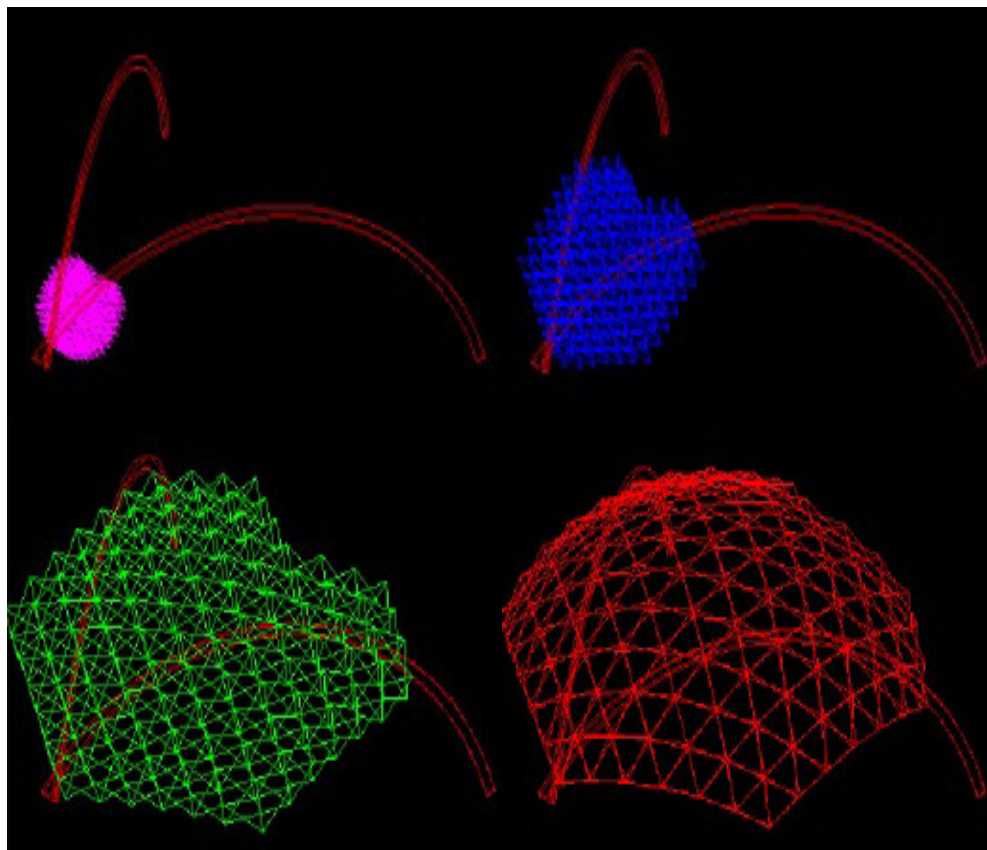
A estabilidade da estrutura é condicionada pelo número de apoios perimetrais. Cada cobertura necessita de 13 apoios.

A colocação da membrana pretende-se compatível com as fases de abertura da estrutura. A membrana está suportada nos nós da superfície inferior da estrutura e mantém-se dentro dela quando em estado recolhido.

Solução desenvolvida com o propósito de cobrir durante o Inverno uma piscina olímpica com 50 x 20m para efeitos de protecção e climatização. Outro requisito é que no Verão a cobertura seja removida sem deixar vestígios no solo.

processo de montagem: *Cubierta para Piscina San Pablo de Sevilla*, Sevilha, 1996, Félix Escrig





OBRA | LOCAL | ANO | AUTOR

Cubierta Desplegable para Estadio Innsbruck, Innsbruck, Áustria, 1999, Félix Escrig

DIMENSÃO | ÁREA DE SUPERFÍCIE

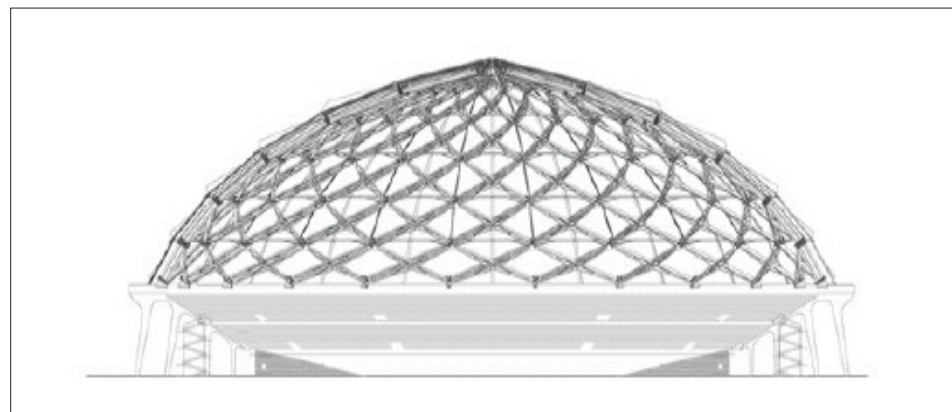
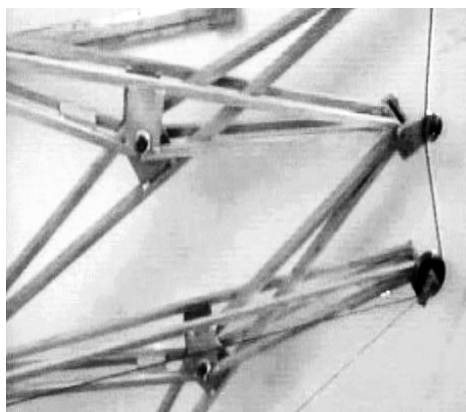
120m de diâmetro

30m de altura

SISTEMA CONSTRUTIVO E CINÉTICO

Cobertura proposta para a arena do estádio desportivo Innsbruck, projectado pela arquitecta Zaha Hadid em 1999.

A malha de módulos triangulares expande-se sobre os dois arcos que a suportam, combatendo a necessidade de recurso a elementos adicionais - como cabos - que garantam a estabilidade da estrutura. A figura de baixo mostra um protótipo desenvolvido à escala 1:20.



OBRA | LOCAL | ANO | AUTOR

protótipo *Iris Dome*, *Museum of Modern Art (MoMa)*, Nova Iorque, 1994, Chuck Hoberman

DIMENSÃO | ÁREA DE SUPERFÍCIE

pormenor a escala 1:100

para 100 m de diâmetro

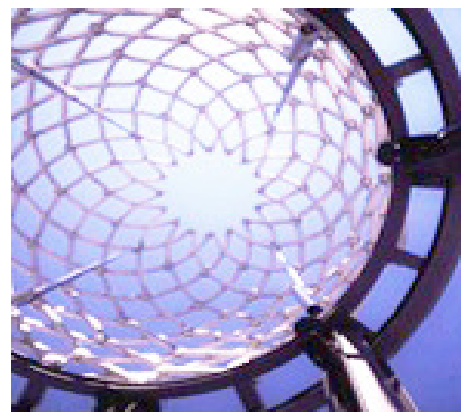
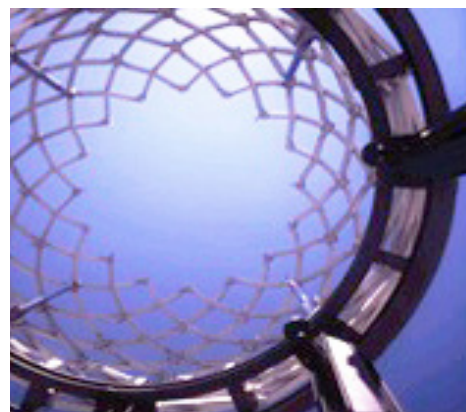
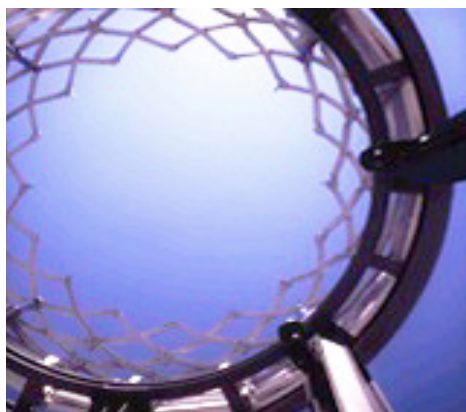
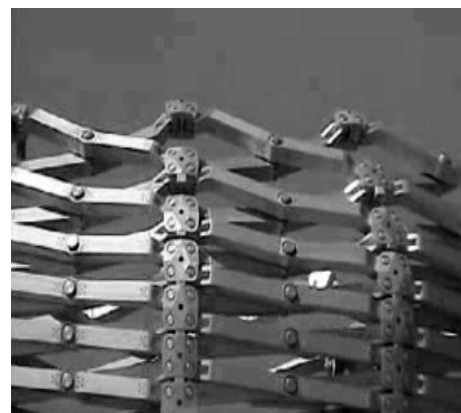
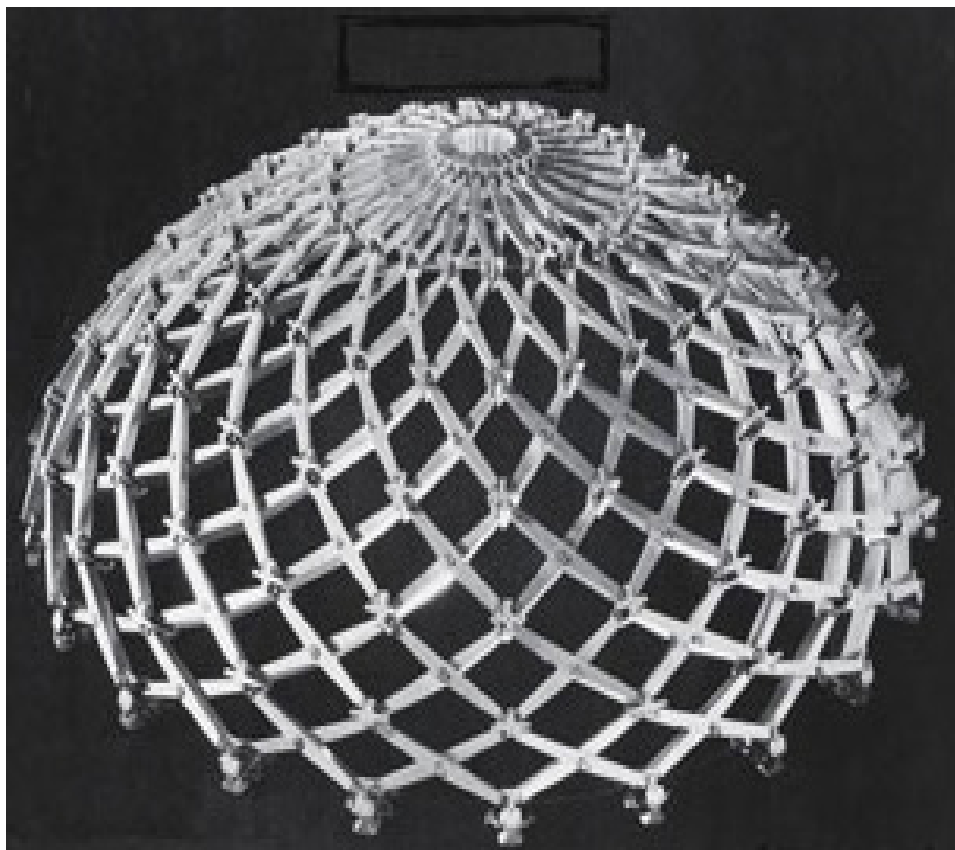
SISTEMA CONSTRUTIVO E CINÉTICO

Sistema de movimento automatizado

É constituída por peças rígidas lineares articuladas em rede segundo variação do sistema pantógrafo.

Estrutura que assinala a introdução de uma nova tipologia de sistema de cobertura retráctil.

A estrutura permite a aplicação de superfícies rígidas como material de revestimento. Quando a cobertura está fechada forma uma superfície contínua, em estado aberto os painéis sobrepõem-se.



OBRA | LOCAL | ANO | AUTOR

Iris Dome, Exposição Internacional, 2000,
Hannover, Alemanha, Chuck Hoberman

DIMENSÃO | ÁREA DE SUPERFÍCIE

10 m de diâmetro

SISTEMA CONSTRUTIVO E CINÉTICO

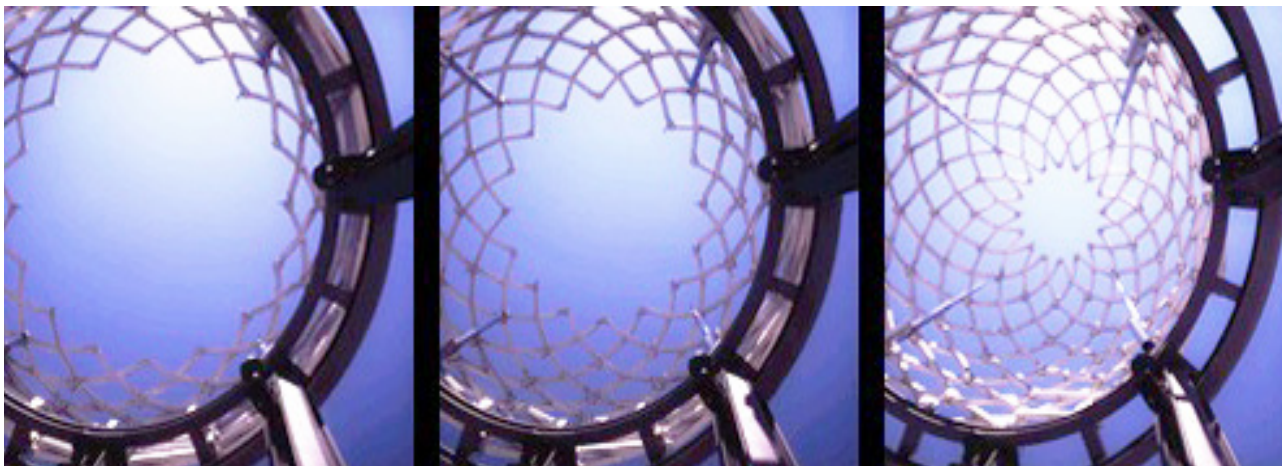
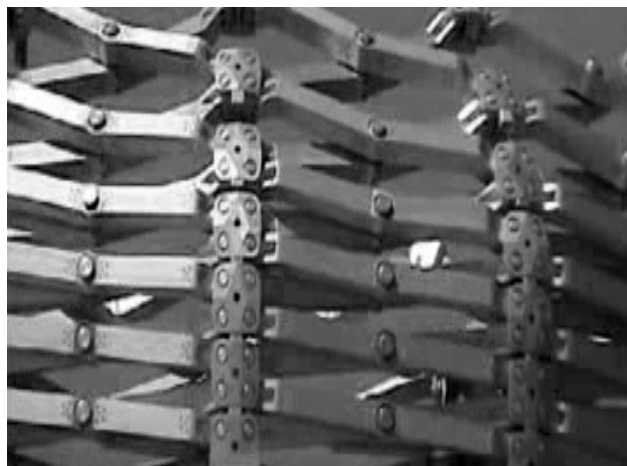
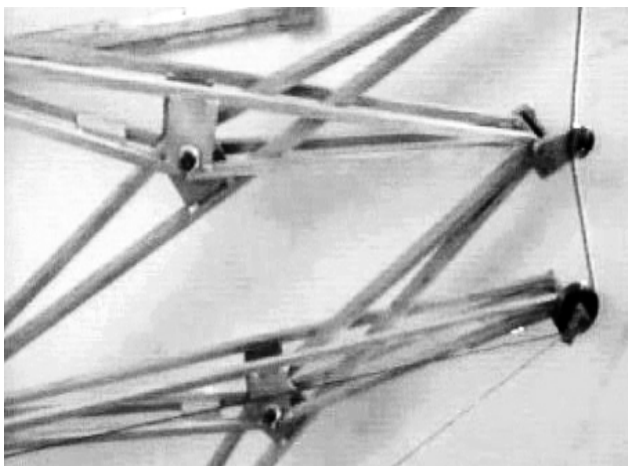
A estrutura recolhe e expande através de 4 braços hidráulicos dispostos no interior da cobertura, num sistema de controlo automatizado.

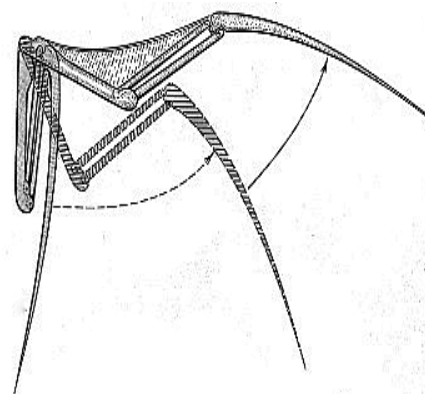
É constituída por peças rígidas lineares articuladas em rede segundo variação do sistema pantógrafo.

A estrutura pretende apontar uma solução de cobertura para a reconstrução da Catedral *Frauenkirche*, em Dresden, Alemanha, destruída pela Segunda Guerra Mundial.

A dimensão do modelo da cobertura corresponde à pretendida para aplicação na Catedral.

processo de montagem: *Iris Dome*, Exposição Internacional em Hanover, Alemanha, 2000, Chuck Hoberman





OBRA | LOCAL | ANO | AUTOR

maquete, estudo de cobertura para exposições, Renzo Piano

DIMENSÃO | ÁREA DE SUPERFÍCIE

desconhece-se

SISTEMA CONSTRUTIVO E CINÉTICO

Cúpula constituída por oito elementos lineares articulados dispostos radialmente em torno de um aro circular e varia em altura através das rótulas que constituem cada peça, com mecanismo de movimento baseado no estudo de asas de vertebrados, nomeadamente de ave (em cima) e de morcego (em baixo). Juntas intermédias em alumínio e peças lineares em madeira.

Mesmo sendo uma proposta que ficou pela maquete verifica-se que para a cúpula ser estável necessita de tirantes de aço em cruz suportados entre cada peça rígida. A estrutura expande e recolhe com movimento idêntico ao da asa de ave.

