

# Arquitectura [Bio]lógica

UMA ANÁLISE DA OBRA DE FREI OTTO



**ANDRÉ JOÃO ABRUNHOSA BARATA CRUZ**

*Dissertação de Mestrado Integrado em Arquitectura*

Sob a orientação do Professor Doutor José Pedro Sousa e  
Professor Doutor Mauro Costa

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Departamento de Arquitectura

*Coimbra, Julho 2012*



# Arquitectura [Bio]lógica

UMA ANÁLISE DA OBRA DE FREI OTTO



## **AGRADECIMENTOS**

Aos Professores José Pedro Sousa e Mauro Costa pelas enormes paciência e apoio que me dispensaram ao longo desta dissertação.

Aos meus Pais e Irmã por todo o amor, confiança e ânimo que sempre me inculcaram.

Aos meus Avós, pelos valores e conhecimentos que me transmitiram.

À minha Tia Teresa, por toda a ajuda durante o meu curso, tal como as intermináveis viagens de maquetas ao dARQ.

À minha Família por todos os belos momentos que temos passado juntos.

À Cláudia, Companheira da minha vida, pelo amor e dedicação constante, nos bons e maus momentos.

A todos os Amigos que nunca deixaram de acreditar em mim.

A todos, muito agradecido.



## SUMÁRIO:

<b>Resumo</b>	IX
<b>Introdução</b>	11
<b>I. Arquitectura e Biologia</b>	21
1.1. Do Passado ao Presente: exemplos da aplicação de modelos naturais na Arquitectura	23
1.2. “Bio-lógicas” na Arquitectura	43
1.2.1. Biónica	45
1.2.2. Biomimética	57
1.2.3. Biotecnológico	65
1.2.3.a. Emergência e Morfogênese	69
1.2.3.b. I.A. e V.A.	75
1.2.3.c. Tecnologias Generativas	81
1.2.3.d. Biomateriais	89
1.3. Formas e Geometrias da Natureza	95
1.4. Analogias Biológicas na Arquitectura	111
<b>II. Frei Otto e Biologia: grupos, técnicas e processos de busca da forma</b>	121
2.1. Conhecer Frei Otto	123
2.2. “Bio-Otto”	127
2.2.1. O conceito pneu	135
2.2.2. O caminho oposto	139
2.2.3. Forma, Força e Massa	145
2.2.4. Tecnologia Animal	153
2.2.5. Arquitectura Ecológica	159
2.3. Centros de investigação de Frei Otto	167
2.3.1. Grupo de investigação Biologia e Construção	167
2.3.2. Instituto de Estruturas Ligeiras - IL	175
2.3.3. Programa de investigação de Estruturas Naturais - SBF230	177



<b>2.4. Construções e técnicas de busca da forma de Frei Otto e do Instituto IL</b>	181
2.4.1. Superfícies mínimas feitas com películas de sabão	187
2.4.2. Estruturas Pneumáticas e Hidráulicas	189
2.4.3. Tendias	193
2.4.4. Construções em rede	197
2.4.5. Construções suspensas	201
2.4.6. Arcos, abóbadas e conchas morfo-resistentes	205
2.4.7. Estruturas ramificadas	213
2.4.8. Caminhos mínimos	217
<b>2.5. Frei Otto e o virtual</b>	221
<b>III. Caso de Estudo</b>	231
<b>3.1. Parque Olímpico de Munique</b>	233
<b>Considerações finais</b>	255
<b>Bibliografia</b>	273
<b>Referências de imagens</b>	287
<b>Anexos:</b>	299
Biografia de Frei Otto	301
Publicações <i>Mitteilungen des IL</i>	309



## RESUMO

### *Arquitectura [Bio]lógica: uma análise da obra de Frei Otto*

Esta dissertação foca-se na relação entre a Arquitectura e a Biologia, tendo como base de estudo a obra do arquitecto alemão Frei Otto. Tem como principal objectivo observar e demonstrar a aplicação de analogias biológicas na Arquitectura, questionando a sua importância e o seu papel na prática arquitectónica.

No contexto biológico pretende-se analisar a relação entre Arquitectura e Biologia através de uma perspectiva temporal, científica, metodológica e conceptual, salientando a elementaridade e o potencial da Natureza como resposta às adversidades arquitectónicas. Este estudo é suportado com a explanação das diferentes ramificações biológicas, entre as quais ganham destaque as áreas da Biónica, da Biomimética e do Biotecnológico.

A obra de Frei Otto surge como exemplo elucidativo deste estudo, reunindo as qualidades necessárias e exemplificativas na adaptação de analogias [bio]lógicas à Arquitectura. Em complementaridade à sua obra, são expostas as participações em distintos grupos de investigação, as metodologias, a forte componente experimental, as técnicas e os processos de busca da forma, caracterizando o seu peculiar percurso como arquitecto.

O Parque Olímpico de Munique, através das suas características arquitectónicas, biológicas e experimentalistas, é analisado como caso de estudo, constituindo um elemento esclarecedor da ligação entre Arquitectura, e a Biologia na obra de Frei Otto. A revisão deste exemplo procura, desta forma, sintetizar e demonstrar os objectivos propostos nesta dissertação.

**Palavras-chave:** Arquitectura, Biologia, Frei Otto, Natureza, Biónica, Biomimética, Biomorfismo, Tecnologia, Parque Olímpico de Munique.



## INTRODUÇÃO

O estudo realizado ao longo desta dissertação tem como principal objectivo demonstrar como duas áreas aparentemente tão divergentes, a Arquitectura e a Biologia, através de um processo sinérgico, podem funcionar em harmonia e ampliar os conhecimentos da prática arquitectónica. Esta sinergia fundamenta-se essencialmente na obra do arquitecto alemão Frei Otto, um dos primeiros a compreender e a aplicar a relevância da Biologia na Arquitectura, consagrando-se assim como elemento central do tema aqui estudado.

Uma das pertinências deste estudo reside na descrição das investigações derivadas da exploração do universo biológico, tentando demonstrar como estas foram sendo e continuam a ser aplicadas à Arquitectura, recorrendo ao uso corrente de analogias. Este processo permite criar novos conceitos, metodologias e tecnologias, gerando um conhecimento empírico e tecnológico capaz de organizar, otimizar e ampliar o conhecimento reunido ao longo da história da Arquitectura.

A Arquitectura é hoje definida como uma disciplina artística dotada de grande complexidade e diversidade face aos problemas que procura resolver. Dominada em conformidade com os processos cognitivos do seu praticante - o arquitecto - realiza um exercício crítico de carácter pessoal (ou colectivo no caso das parcerias) centrado nas crenças, nos conceitos e nas soluções geradas pela inteligência humana. Se analisarmos este processo cognitivo de que o arquitecto é dotado, deparamo-nos com a presença de uma arbitrariedade conceptual, que muitas das vezes pode potenciar resultados erróneos, menos válidos, ou inclusivamente, limitadores da prática arquitectónica.

Pretende-se assim demonstrar como as leis e princípios responsáveis pela génese da Natureza poderão contribuir com um valioso conhecimento para a prática arquitectónica, permitindo novas resoluções nesta problemática. Ou seja: acreditamos que a Arquitectura, apoiada e motivada por diversos princípios integrativos do longo processo evolutivo da Natureza, poderá ganhar melhores e maiores viabilidades.

Através da Biologia, com efeito, podemos assimilar melhor os motivos responsáveis pela génese e relação entre a forma e a função, tal como a sua interação com o meio ambiente. Esta logística milenarmente apurada e isenta de falsos valores



oferece ao arquitecto uma compreensão universal na geração de soluções, de objectos, de espaços, das necessidades humanas e da relação entre o Homem, a Arquitectura e o Planeta. Acreditamos por isso que este conjunto de valores deve ser assimilado, contribuindo, assim, para uma melhoria nos objectos produzidos pela Arquitectura

O ser humano, as ciências humanas e a Arquitectura constituem três elementos ligados à Biologia. Se observarmos os múltiplos exemplares arquitectónicos, deparamo-nos pontualmente com exemplos de formas e conceitos provenientes do universo natural; no entanto, em grande parte dos casos a sua aplicação resume-se meramente à “mimesis” injustificada de biomorfismos. Por vezes, são extrapoladas para o domínio da Arquitectura formas biológicas, sem que exista um profundo entendimento dos processos responsáveis pelas suas origem, sua finalidade, função, ou equilíbrio entre o construído e o espaço envolvente.

Este processo “inconsciente” revela um desentendimento dos princípios básicos da Biologia e das qualidades organizacionais, culturais e ambientais que constituem o ser humano. Embora seja possível constatar o contrário, através de exemplos elucidativos de uma boa prática arquitectónica todavia, grande parte da arquitectura dos últimos séculos tem (numa análise periférica) uma profunda ausência do entendimento das necessidades biológicas primordiais.

Na verdade, em grande parte dos casos, potencialmente influenciada pelo “modelo causa-efeito” de ocupação territorial sentido nas grandes urbes, a Arquitectura não tem conseguido oferecer uma simbiose harmónica entre o ser humano, o construído e a sua envolvente. Causas como a forte exploração material proveniente deste modelo social, predominado por uma cultura desnecessária de consumismo e obsolescência, têm demonstrado como o Homem (tal como a Arquitectura) eleva os limites e explora os recursos à sua disposição de forma “destrutiva”, negando o equilíbrio entre o planeta e a sua ocupação pelo ser humano.

Face a esta problemática, com o estudo aqui apresentado do universo biológico e das suas simbioses, pretende-se oferecer pistas para um possível reforço da coerência arquitectónica sentida neste tópico, reunindo conhecimentos, soluções e mecanismos provenientes da exploração biológica, capazes de exprimir uma melhor eficiência arquitectónica, construtiva, material e metodológica. Assim, acreditamos que, através de uma visão científica do mundo biológico, possam ser extraídos valores e



conhecimentos capazes de equilibrar as necessidades humanas e arquitectónicas, apoiadas na experiência e na capacidade da Natureza em construir soluções “perfeitas” e harmónicas com o todo.

*“A ciência, como uma das mais relevantes aquisições culturais humanas, serve de guia no desenvolvimento da maioria da investigação, mostrando potenciais campos exploratórios e respectivas conexões entre as distintas disciplinas científicas, que podem ajudar a aplicação de analogias biológicas na prática profissional do arquitecto, urbanista ou desenhador.”<sup>1</sup>*

Na prossecução das ambições já mencionadas, esta dissertação é dividida em três capítulos principais para demonstrar como a triangulação entre Arquitectura/Biologia/Frei Otto reúne e expõe o potencial das explorações biológicas na Arquitectura.

O primeiro capítulo, intitulado **Arquitectura e Biologia**, tem como principal objectivo salientar a relação existente entre estas disciplinas. Através de uma síntese cronológica, demonstra-se como a Biologia tem influenciado a Arquitectura ao longo dos séculos, reflectindo a variedade e potencialidade em diferentes arquitectos e objectos arquitectónicos.

Através da contextualização e diferenciação dos variados conceitos biológicos, observamos como estes têm influenciado as diferentes áreas de investigação da Biologia, bem como a sua aplicação à Arquitectura. Estas áreas são analisadas e diferenciadas segundo as principais ramificações provenientes desta exploração biológica - a Biónica, a Biomimética e o Biotecnológico.

Os conhecimentos, as metodologias e as ferramentas adquiridas na exploração biológica são extrapoladas para as suas componentes científicas através do uso corrente de analogias, pelo que é necessário compreender o seu significado e o processo implícito quando reutilizamos soluções do mundo natural. Deste modo é aprofundado o

---

<sup>1</sup> COSTA, Mauro - *Analogias Biológicas en la Arquitectura – Del acercamiento biónico hacia los paradigmas de lo biodigital*. p.15 . [trad. do a.].



conceito da analogia apoiado nos principais mentores desta área, possibilitando uma melhor compreensão e contextualização da sua aplicação às outras áreas.

À contextualização das diversas áreas, das metodologias e dos resultados provenientes do estudo da Biologia, sucede o segundo capítulo, intitulado **Frei Otto e Biologia**. Como já foi referido, Frei Otto é um pioneiro e destacado arquitecto, reconhecido por uma vasta e diversificada obra singular caracterizada por um elevado carácter experimental. Entendemos mesmo que Frei Otto constitui o melhor exemplo para demonstrar como é possível a Arquitectura apreender e evoluir pela absorção de fenómenos naturais. Numa tentativa de estado da arte, expõem-se as variadas e determinantes componentes capazes de reunir e exemplificar a obra de Frei Otto.

Arquitecto, engenheiro, cientista e inventor são alguns dos atributos que melhor podem descrever o percurso de Otto. Com uma carreira de seis décadas, podemos caracterizar a sua obra como pioneira nas inovações construtivas, na tecnologia material e na construção de formas, as quais, suportadas pelas suas experiências e participação activa em vários grupos de investigação, constituíram valioso contributo tanto para Arquitectura como para a Engenharia.

A complexidade presente nos resultados oferecidos por Otto gerou um especial interesse em reunir e descrever detalhadamente as suas obra e peculiar metodologia, revelando-se grande parte da sua pesquisa, em que a Natureza surge como elemento impulsionador à arquitectura por ele praticada.

Nessa sequência, este capítulo reúne os grupos, as metodologias, os resultados e os projectos obtidos ao longo da sua carreira, de modo a permitir uma maior compreensão do seu contributo para a Arquitectura e também a revelar como usufruiu do universo natural para pôr em prática os seus conhecimentos e ideologias. Esta variedade de estudos e resultados revelou-se de grande valia para o estudo aqui apresentado, consagrando-se assim como o elemento principal e estruturador desta dissertação.

O terceiro e último capítulo, intitulado **Caso de Estudo**, centra-se na análise do projecto *Parque Olímpico de Munique* de 1972. Embora este exemplo resulte de um longo exercício dotado de experimentação, de mudança e de uma parceria entre várias entidades ao longo do seu planeamento e execução, no entanto deve desde já salientar-se que Frei Otto foi o elemento principal e o grande responsável pela sua apoteose.



Pela análise deste exemplo, podemos não só comprovar os princípios regedores da obra e metodologia de Otto, mas também perceber como através do uso da tecnologia e conhecimento adquiridos pela Biologia é possível solucionar os problemas provenientes da prática arquitectónica.

A forte componente experimental presente ao longo da sua obra ganha um destaque crucial na execução do projecto, pois num período limitado pelos escassos avanços tecnológicos e caracterizado pela ausência das potenciais ferramentas arquitectónicas da actualidade, Frei Otto conseguiu criar um suporte construtivo capaz de ultrapassar as dificuldades apresentadas pelo projecto em causa, através do uso de vários modelos físicos, do método experimental e da Biologia.

Pretende-se assim demonstrar como a experimentação e a comprovação se podem revelar como factores determinantes para uma boa prática arquitectónica, e que, pela sua aplicação, a viabilidade conceptual, funcional e construtiva evolui significativamente; a análise deste projecto também revela a inexistência de um caminho universal válido para construir ou planear, pelo qual devemos construir seguindo continuamente um exercício de experimentação e comprovação, eliminando os vários obstáculos ao longo do processo criativo.

Em síntese, este trabalho pretende demonstrar como os conhecimentos provenientes da Biologia podem evoluir e gerar princípios válidos de grande utilidade para a Arquitectura, apresentando alguns exemplos elucidativos desta sinergia.

Dada a vastidão e complexidade presente na análise de fenómenos provenientes da Biologia, faz-se notar que os exemplos implícitos neste estudo surgem com a finalidade de exprimir e compreender como a Natureza é capaz de construir boas soluções, de forma implacável, face à complexidade dos problemas inerentes à interação das suas partes com o meio ambiente.



## **I. Architectura e Biologia**



### 1.1. Do Passado ao Presente: exemplos da aplicação de modelos naturais na Arquitectura

Observando a longa e complexa história da Humanidade, é possível constatar a aplicação de soluções biológicas em diferentes eras, ciências e tecnologias, de entre outros “produtos” de natureza humana. Sejam elas de carácter biomórfico, biónico ou orgânico, o resultado e o uso destas invenções biológicas têm revelado e possibilitado um grande número de inovações e de recursos ao longo da evolução humana. Curiosamente, a Arquitectura foi uma das várias ciências humanas em que a aplicação de “soluções naturais” manifestou-se desde muito cedo, oferecendo novas doutrinas à prática, pensamento, métodos e modelos deste universo. Embora o uso destas analogias biológicas seja diferenciado segundo diferentes universos, é possível constatar a presença de “fenómenos biológicos” desde os primeiros exemplos arquitectónicos até aos da actualidade. O arquitecto Alberto Estévez<sup>2</sup> faz a distinção destes fenómenos, utilizando os conceitos de biomórfico, biónico e orgânico da seguinte forma:

*Arquitectura biomórfica:* cujas formas são semelhantes à dos seres vivos. O seu resultado pode ser ou não reflexo de um acto voluntário do autor, tal como o espectador pode considerar ou não a sua semelhança com os seres vivos. A sua criação é inspirada na natureza feita de memória ou de cópia, em que as formas podem manifestar-se desde a representação mais fotográfico-realista até ao mais abstracto.

*Arquitectura biónica:* cujo funcionamento, sistemas ou processos são semelhantes aos dos seres vivos, que adopta como modelos.

*Arquitectura orgânica:* funde em unidade e continuidade os elementos que respondem a funções distintas, como aparecem nos organismos vivos. Em

---

<sup>2</sup> Alberto T. Estevez é um arquitecto espanhol, professor-doutor, historiador da Arte, um dos principais fundadores e primeiro director da Escola de Arquitectura ESARQ-UIC, em Barcelona; é um dos pioneiros e principal responsável pelo estudo entre a Biologia e Arquitectura no seu país. Grande parte da sua carreira e investigação tem incidido sobre a aplicação da Genética na Arquitectura e, no ano 2000, criou o primeiro Laboratório de Arquitectura Genética do mundo (GERNARQ).



↖ Fig.1 Exemplar de um abrigo primitivo do Paleolítico.

↗ Fig.2 Construção primitiva feita em canas.

↓ Fig.3 Reconstituição de um abrigo construído com ossos de mamute encontrados em Mezhirich, Ucrânia.

especial, funde num único elemento contínuo a dicotomia entre os elementos portantes e suportados.<sup>3</sup>

No entanto, dada a sua complexidade e os inúmeros resultados fruto da evolução humana, apenas alguns exemplos serão apresentados de forma sintética, com a intenção de demonstrar e constatar o uso destas soluções naturais na arquitectura, ao longo da história da Humanidade.

*“[...] a história da arquitectura está mais ligada à arquitectura biomórfica que não a outra coisa. Sobretudo em términos de centúrios de anos.”<sup>4</sup>*

Se considerarmos os abrigos como as primeiras construções humanas, é possível afirmar que surgem da necessidade primitiva de protecção e sobrevivência que o Homem sentiu desde sempre. Estes abrigos, feitos de palha, vegetação ou qualquer outro material orgânico, foram utilizados maioritariamente como protecção temporária no período de nomadismo vivido no início da Humanidade. Apesar da sua simplicidade, revelam uma componente biomórfica e técnicas de construção muito semelhantes a outros seres, nos quais podemos encontrar aspectos biomórficos ao compararmos as forma e função.

Após as primeiras manifestações artísticas (pinturas rupestres), o início da sedentarização do Homem com o surgimento da Agricultura no Neolítico provocou a necessidade de estabelecer e controlar o espaço envolvente, fazendo surgir as primeiras construções em zonas geográficas onde actualmente se situam a Rússia, Republica Checa e Ucrânia, nos períodos de 22.000, 20.000 e 15.000 A.C. Estas foram feitas a partir de elementos construtivos”, capazes de transmitir uma intenção de limitar e de construir o espaço. Acreditamos que exista uma intenção arquitectónica por detrás deste gesto, pois tais construções foram feitas com os enormes ossos e chifres de marfim, provenientes de cemitérios e de caça de mamutes. Não só surge a procura de matéria para construir, como também um novo sentido de estética, ordem e estrutura.

---

<sup>3</sup> ESTEVÉZ, Alberto T. - *Arquitectura biomórfica: Primera historia de la arquitectura genética o ¿la arquitectura genética es biomórfica? Organicismo digital, la vanguardia arquitectónica de los primeros años del sigloXXI*. p.29. [trad. do a.].

<sup>4</sup> ESTEVÉZ, Alberto T. - *Arquitectura biomórfica: Primera historia de la arquitectura genética o ¿la arquitectura genética es biomórfica? Organicismo digital, la vanguardia arquitectónica de los primeros años del sigloXXI*. p.5. [trad. do a.].



↑ Fig.4 Conjunto funerário de Zoser em Saqqara, Egito. Construído no reinado de Imhotep em 2780-2680 a.C.  
↓ Fig.5 As cariátides do Templo de Erecteion na Acrópole de Atenas, Grécia. 421-406 a.C.

Estes materiais construtivos eram utilizados ordenadamente em contra-esforço, criando um espaço, como regra, constituído por uma ou várias arcadas, e em alguns casos de tal maneira extensas que chegaram a totalizar 20 toneladas de puro marfim.

Embora primitivo, um novo gesto nasce assim na arte de construir. O abrigo, que antes era feito com um carácter exclusivamente funcional, passa a ser complementado com a preocupação da forma, em que surge o “adorno” e a necessidade de criar uma nova composição figurativa. Curiosamente, e segundo a opinião de certos investigadores, esta nova estética muitas vezes era construída com elementos longínquos (como é o caso do uso de fósseis para fins decorativos) o que revela a intenção de criar uma nova decoração ou uma nova estética biomórfica, nunca antes experimentada em construções humanas. Surge então um dos *primeiro exemplos* de arquitectura biomórfica.

Na III dinastia do Egipto, no reinado de Imhotep (ano 2780-2680 A.C.), outro exemplo situado em Saqqara - o *Conjunto funerário de Zoser* - revela novos atributos nunca antes utilizados. O edifício é construído com um novo material, a pedra, capaz de garantir a eternidade digna do sepulcro do faraó. No entanto, a rudeza e irregularidade deste material seria combatida com novos adornos locais do rio Nilo. Capiteis, colunas e paredes ganham uma nova caracterização, feita através dos vários exemplos de vegetação encontrados na região em que se insere.

Este tipo de biomorfismo também está presente na arquitectura clássica da antiga Grécia: embora construídos inicialmente em madeira, um material orgânico, mais tarde os templos passariam a ser construídos em pedra, permitindo, tal como nos egípcios, a digna e merecida imortalidade. Apesar da mudança de material, as formas e estruturas construídas continuavam a imitar as anteriores, exibindo, assim, os biomorfismos presentes nas construções em madeira. As colunas e capiteis podem ser considerados exemplos desta representação biomórfica, muitas vezes decorados com motivos florais ou mesmo humanos, como as colunas femininas do *Templo de Erecteion*.

Ao longo do tempo, este biomorfismo vai perdendo algum significado, transformando-se simplesmente num conjunto de regras capaz de sintetizar as normas de composição da arquitectura clássica, como o reflexo das arquitecturas romana, renascentista, barroca, neoclássica, entre outras. Podemos encontrar posteriormente



alguns apontamentos biomórficos, mas sempre neste contexto em que perdura a tentativa de reprodução da arquitectura clássica.

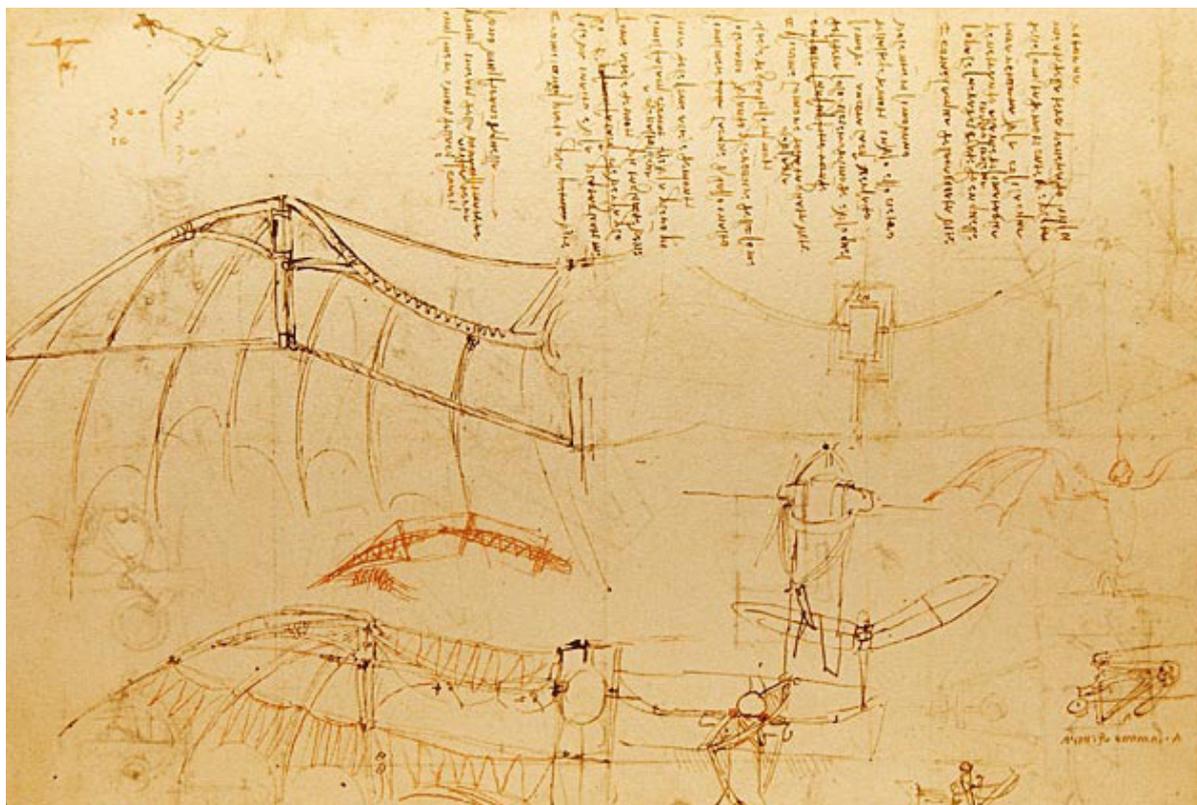
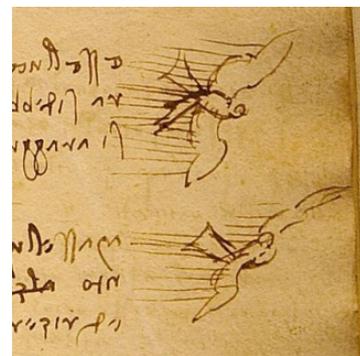
No entanto outros tipos de manifestações biológicas se depararam na História da Humanidade. Ao reduzirmos, por exemplo, a complexa estrutura de uma teia de aranha a uma estrutura suspensa entre dois ou mais pontos de apoio, podemos de certa forma comparar estes mecanismos de construção aos das catenárias. Assim, podemos descrever a ideia de catenária à suspensão de um corda pelas extremidades, em que a gravidade descreve a curvatura necessária capaz de distribuir uma força aplicada de forma simétrica em todos os pontos. As catenárias (da família das curvas planas) propostas por Galileu Galilei, e mais tarde decodificadas por outros matemáticos, desempenharam um papel importante na história da Arquitectura. O uso consciente, ou não, destas conseguiu oferecer soluções construtivas nos períodos em que o cálculo estático era desconhecido. É, por exemplo, o caso do *Palácio de Ctesifonte*<sup>5</sup> no Iraque, construído no séc. VI. Embora anterior à formulação das catenárias, sua forma e vão revelam uma relação directa com as catenárias invertidas, cuja construção, com mais de 30 metros de altura e 60 de largura, foi considerada a maior abóbada de tijolos do mundo antes do séc. XX.<sup>6</sup>

Se convertermos esta analogia ao período gótico, no qual surge o arco quebrado ou de ogiva, verificamos que o princípio deste assemelha-se ao de uma catenária. A sua utilização permitiu substituir o arco românico de volta redonda, o qual distribuía uma carga maior pelas paredes, limitando a arquitectura deste período às paredes grossas, contrafortes pesados e poucas aberturas. Embora não tão eficaz como as catenárias, o mecanismo de descargas do arco quebrado revela-se muito idêntico ao daquelas. Mais tarde, outro arquitecto usufruiria destas curvas, possivelmente da forma mais exaustiva e brilhante na história da arquitectura: Antoni Gaudí, com os seus modelos invertidos de correntes, explorou todo o potencial das catenárias durante a sua obra, em especial na *Sagrada Família*.

---

<sup>5</sup> Ctesifonte foi uma das maiores e principais cidades da Mesopotâmia, e a capital do Império Arsácida e do seu sucessor, o Império Sassânida. Localizada no antigo reino da Pérsia, a cidade revelou-se como ponto estratégico e de grande objectivo militar para os romanos, sendo conquistada cinco vezes. Ctesifonte é mencionada pela primeira vez no Livro de Esdras, no Velho Testamento.

<sup>6</sup> COSTA, Mauro - *Analogias Biológicas en la Arquitectura – Del acercamiento biónico hacia los paradigmas de la biodigital*. p.101.



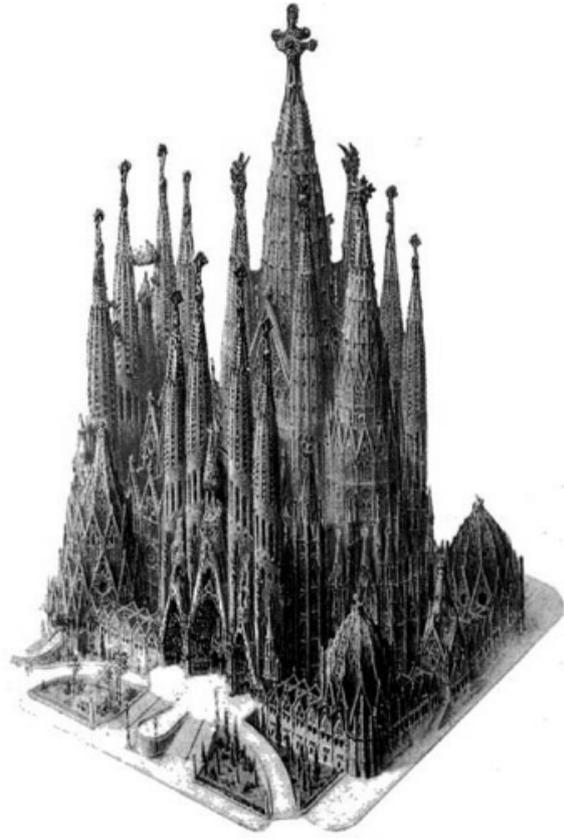
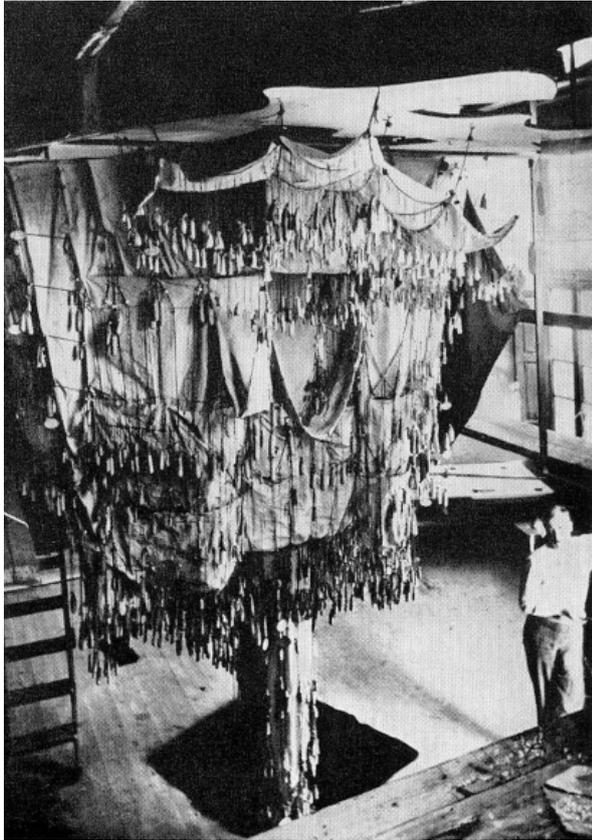
↑ Fig.6 Palácio de Ctesifonte, Iraque. Construído entre 272 e 242 a.C.  
 → Fig.7 Esboços de da Vinci no estudo *Sul volo degli uccelli*.  
 ↓ Fig.8 Estudo biônico de Leonardo da Vinci.

Fugindo ao tema da Arquitectura e pelo impacto que seu pensamento teve na História do Homem, pensamos ser conveniente mencionar Leonardo da Vinci como um dos primeiros a estudar as formas e funções presentes na Natureza. Se observarmos a procura exaustiva do voo humano, uma busca insaciável que se fez sentir durante séculos por inúmeros investigadores, podemos constatar que, apesar de alguma falta e limitação de conhecimento, da Vinci seria o primeiro a aproximar-se dessa posterior realidade. O seu estudo intensivo *Sul volo degli uccelli* (ou *voo dos pássaros* em português) revela claramente quais seriam os mecanismos necessários para tornar possível o impensável. Este é um exemplo em que, não através da cópia literal do pássaro, mecanismos biónicos baseados neste possibilitariam da Vinci em conseguir tamanha proeza.

Leonardo da Vinci acabaria por representar outras ideias, como resultado da sua observação da Natureza. Infelizmente, e devido às limitações tecnológicas da época, não seriam comprovadas, mas no entanto constituíram impulso para futuros investigadores. É o caso do pára-quedas de da Vinci, modelo que seria construído mais tarde por Adrian Nicholas em 2003, com fibras e materiais capazes de reproduzir tal invenção. Não é de admirar que tal invenção, mesmo com uma forma rudimentar perante a dos actuais, foi capaz de fazer planar um peso morto de 85kg desde os 3.000 pés de altitude até ao solo, com sucesso.

Avançando no tempo rumo aos inícios do século XX , é de salientar o aparecimento de uma nova “tendência”, que quebrou e rejeitou a arquitectura historicista sentida no passado, procurando a linguagem mais adequada a uma arquitectura moderna. No entanto, esta linguagem continuaria ligada ao uso de formas, mecanismos e estratégias naturais.

Agora com uma maior liberdade e autonomia, formas curvas, linhas fluídas e novos resultados surgem na arquitectura moderna. Antoni Gaudí foi o arquitecto que mais se destacou nesta luta contra o classicismo histórico revelado pela arquitectura do passado. Embora inserido num estilo, a sua obra destacou-se de todas as outras deste período, construindo uma linguagem única no que diz respeito à imagem, às soluções construtivas, à organização espacial, bem como à ornamentação e aos temas explorados.



↖ Fig.9 Modelo invertido da Colónia Güell construído com catenárias. Gaudi.

↗ Fig.10 A Sagrada Família de Gaudi. 1882 -.

↓ Fig.11 Fachada de *La Pedrera* de Gaudi. 1906-1910.

Inúmeras são as influências biológicas presentes na sua obra que podem ser interpretadas de várias maneiras. Se a analisarmos esteticamente, podemos sentir a predominância de uma arquitetura orgânica, cheia de curvas e contracurvas, onde elementos da natureza são desenhados e adotados em vários elementos arquitectónicos.

As varandas de *La Pedrera* (1906-1910, onde delicadas folhas servem de guardas), os vários elementos biomorfos presentes no *Parque Güell* (tais como os répteis e/ou dragões), como o pináculo em forma de cogumelo ou a cobertura da *Casa Batló* (coberta de “escamas”), são alguns dos exemplos da reprodução ou inspiração de formas biológicas que se reflectem na sua obra.

Outro aspecto, que consideramos ainda mais relevante, deve-se ao tratamento e noção de espaço criados por Gaudí. A sua arte reflecte uma arquitectura vernacular feita de espaços cavernosos, cores, texturas e uma luminosidade tão peculiar capazes de fazer sentir uma atmosfera natural. São exemplos elucidativos o *Parque Güell*, a *Casa Batló*, a *Sagrada Família* ou a *Igreja da Colónia Güell*.

No concernente às suas formas, é visível a influência assumida da Biologia na sua obra. Como ele próprio afirmou, “*Tudo sai do grande livro da Natureza*”, onde elementos como “*esta árvore junto ao meu atelier é o meu mestre*”<sup>7</sup>. Formas naturais, como as espirais ou helicóides presentes nos caracóis ou búzios, invadem a obra de Antoni Gaudí. Este crescimento exponencial presente em tantos exemplos naturais revela-se uma variante obsessiva no seu trabalho. Encontramo-los na maior parte da sua obra, através das torres, colunas, pináculos ou escadarias em caracol, seja na *Casa Batló*, ou no *Parque Güell*, além de outros exemplares.

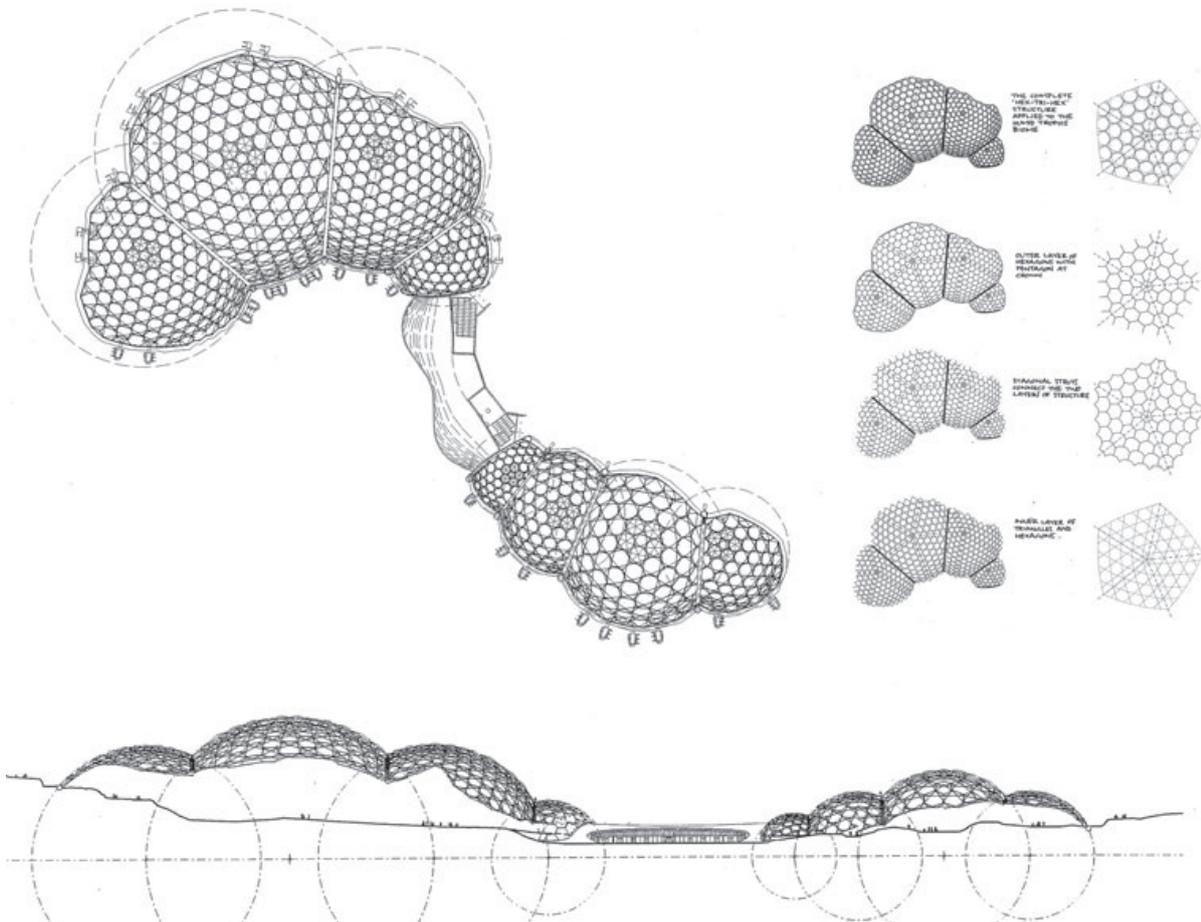
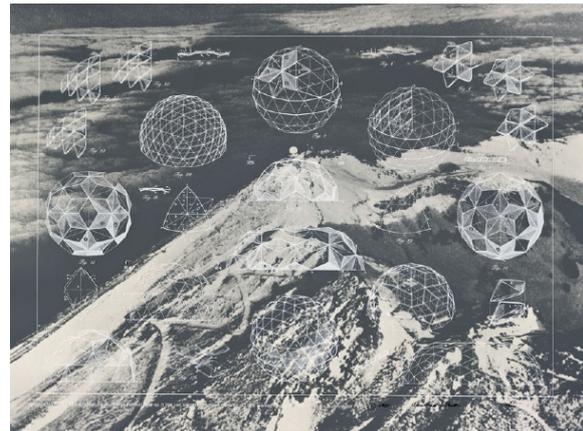
No entanto, o uso mais evidente da natureza na arquitectura gaudiana reside nas suas estruturas inovadoras, cujas formas são claramente biomórficas.<sup>8</sup> Feitas através de parabolóides, hiperbolóides e helicóides, as suas estruturas de geometria regulada abaulada rentabilizam as descargas das forças de forma única<sup>9</sup>. Tal como nos ossos da

---

<sup>7</sup> Cf. ESTEVÉZ, Alberto T - *Arquitectura biomórfica: Primera historia de la arquitectura genética o ¿la arquitectura genética es biomórfica? Organicismo digital, la vanguardia arquitectónica de los primeros años del sigloXXI*. p.8.

<sup>8</sup> Segundo Alberto Esteves “[...] nem arquitectos nem engenheiros tinham aplicado antes, só a natureza.” In. ESTEVÉZ, Alberto T. - *Arquitectura biomórfica: Primera historia de la arquitectura genética o ¿la arquitectura genética es biomórfica? Organicismo digital, la vanguardia arquitectónica de los primeros años del sigloXXI*. p.10. [trad. do a.].

<sup>9</sup> ESTEVÉZ, Alberto T - *Arquitectura biomórfica: Primera historia de la arquitectura genética o ¿la arquitectura genética es biomórfica? Organicismo digital, la vanguardia arquitectónica de los primeros años del sigloXXI*. p.10.



↖ Fig.12 Edifício Montreal Biosphère de Fuller.1967.  
 ↑ Fig.14 Planta de cobertura e secção do Eden Project.

↗ Fig.13 Cúpulas geodésicas de Buckminster Fuller.  
 ↓ Fig.15 Vista panorâmica do Eden Project.

maior parte dos seres vivos, esta forma abaulada permite não só uma maior distribuição de forças, mas também uma redução entre material e função, economizando a sua rentabilidade. Assim, através de mecanismos rudimentares – os modelos suspensos de correntes invertidos – Gaudí consegue reproduzir e calcular as suas estruturas numa época em que o cálculo estático era nulo. Estes modelos, através de catenárias, possibilitaram o cálculo e curvaturas necessária de cada elemento estrutural, originando obras tão emblemáticas como a Sagrada Família.

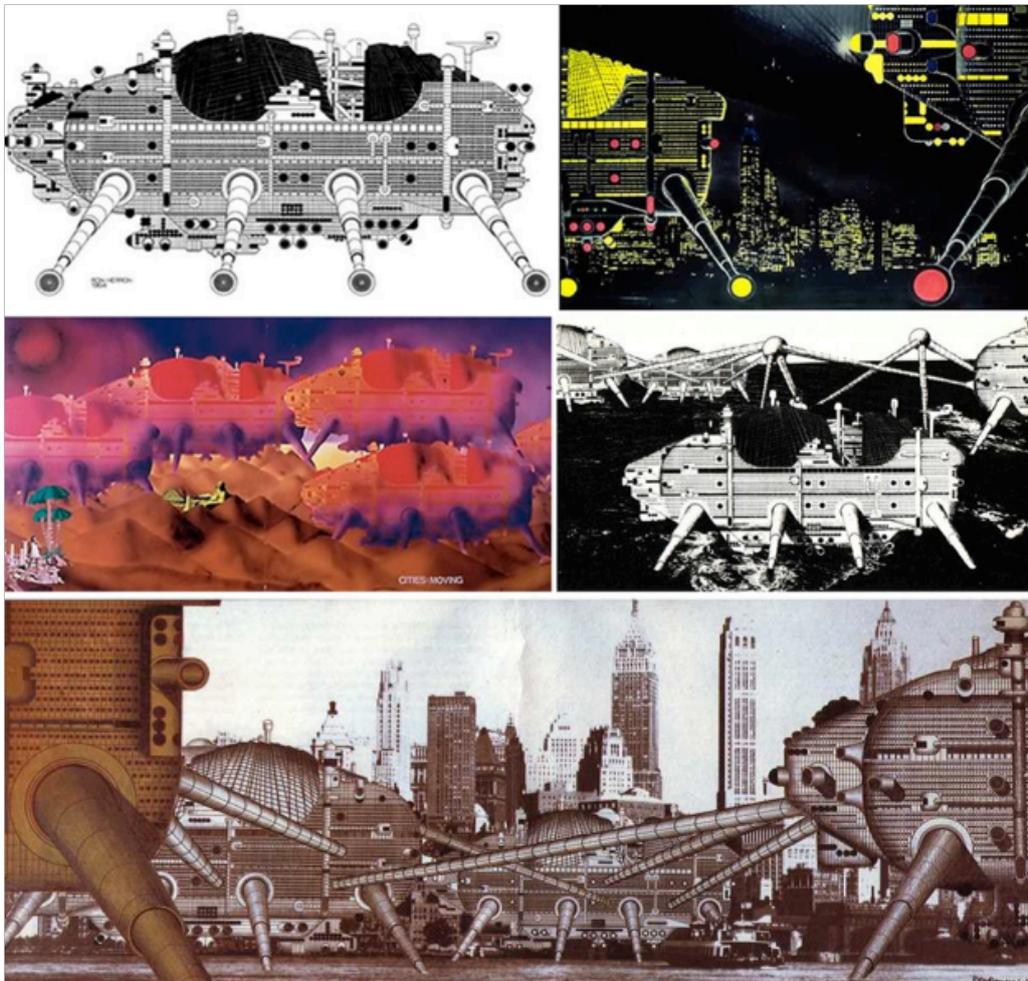
Gaudí não só conseguiu traduzir a eficácia e resistência presentes em modelos naturais, como criou formas nunca antes sentidas na Arquitectura. De certa forma, tal como surge na evolução biológica - onde a forma e função é apurada diminuindo o gasto energético e aumentando a eficácia - Gaudí conseguiu apurar a relação entre a estrutura e a forma de seus edifícios, numa eficácia estrutural e formal nunca constatada no mundo da arquitectura. Nesta matéria, revelou-se um visionário da forma arquitectónica, um verdadeiro “da Vinci” da arquitectura moderna deixando um legado tão pessoal, peculiar e inspirador.

Posteriormente a Gaudí, outros arquitectos e engenheiros do século XX denotam no seu trabalho uma forte inspiração da Natureza. É o caso das cúpulas geodésicas. Embora a invenção destas estruturas seja atribuído a Richard Buckminster Fuller<sup>10</sup> pela sua patente em 1954, o primeiro modelo é construído pelo engenheiro alemão Walter Bauersfeld (1879-1959) para o primeiro planetário *Zeiss Optical Works*, em Jena, Alemanha. Esta estrutura surge da necessidade do projecto de criar uma esfera oca de grande dimensão, a qual, através de rotação, simularia o movimento do planeta. Esta estrutura é constituída por elementos tubulares de aço dispostos segundo uma trama derivada do icosaedro.

Embora não tenha sido o primeiro inventor, Buckminster Fuller seria a personagem principal no que diz respeito às cúpulas geodésicas, atribuindo o sucesso da sua invenção à sua persistência, investigação, metodologia e formulação segundo tentativa-erro. Contudo, no Instituto Max Planck em Berlim, através do biólogo Johann-

---

<sup>10</sup> Richard Buckminster Fuller (1895-1983) é o arquitecto americano mundialmente conhecido pelas suas cúpulas geodésicas. Fuller, que pode ser considerado arquitecto, engenheiro, investigador, inventor ou matemático, estudou e desenvolveu relações geométricas portantes capazes de cobrir grandes superfícies e que actualmente constituem a “base” da construção geodésica. Entre as várias obras destacamos a esfera do Pavilhão E.U.A. da *Exposição Universal de Montreal* em 1967, a casa automobilística Ford em 1953 ou a cúpula geodésica da *Exposição Norte-americana de Moscovo* de 1959.



↑ Fig.16 *Greek Work Room* e os pilares *Lily Pad*. Projecto *Johnson Wax Building* de Frank Lloyd Wright.  
 ↓ Fig.17 *The Walking City* dos Archigram.

Gerhard Helmcke, seria confrontado com enorme semelhança entre as suas conhecidas cúpulas e as diatomáceas. Neste instituto, Fuller tem a oportunidade de observar fotografias microscópicas, ampliadas entre 5 e 50.000 vezes, de algas de conchas de silício (diatomáceas).<sup>11</sup>

*“Viu os trabalhos de Helmcke, especialmente as imagens estereomicroscópicas de diatomáceas e radiolários; elas punham-se de pé e queria agarrá-las! Foi muito engraçado. Ficou impressionado ao ver como a natureza viva era mais rápida a inventar do que ele próprio.”*<sup>12</sup>

Não são apenas estes organismos unicelulares que se assemelham aos seus modelos, mas também os radiolários (*Radiolária*), nos quais é possível observar uma *construção* quase idêntica à das cúpulas de Fuller. Este tipo de biomorfismo também está presente nas cúpulas geodésicas do *Eden Project* concebidas por Tim Smit e projectadas por Nicholas Grimshaw. Este projecto é a maior estufa do mundo e encontra-se em Cornwall, no Reino Unido.

No projecto *Johnson Wax Headquarters*, construído entre 1944 e 1951, face ao problema estrutural que a dimensão do vão do *Great Work Room* possuía, Frank Lloyd Wright também reutiliza uma solução biológica capaz de vencer este problema. A forma comum de um cogumelo é adaptada aos pilares estruturais, que suportam a cobertura deste projecto. Segundo esta analogia, Wright consegue alargar o espaço entre pilares, tal como reduzir o número do mesmo, permitindo desta forma a viabilidade estrutural necessária para a sua construção. Os pilares cogumelos ou *lily pad*, como o próprio designou, foi um avanço tecnológico da sua época, que hoje ainda é possível observar em vários exemplos construídos, tal como em pontes ou viadutos rodoviários

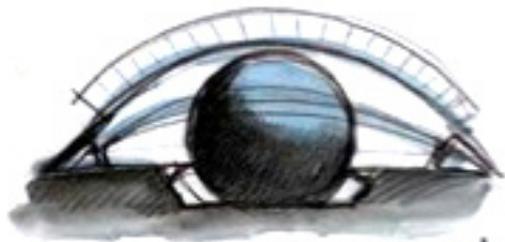
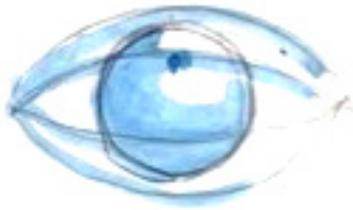
Inevitável seria falar dos *Archigram* e das suas ideias vanguardistas, grande parte das vezes utópicas. Este grupo inglês foi constituído em 1961 por vários arquitectos: Peter Cook, Ron Herron, Warren Chalk, Dennis Crompton, Michael Webb e David Greene. Tinha como principal objectivo idealizar uma visão do futuro, os equipamentos

---

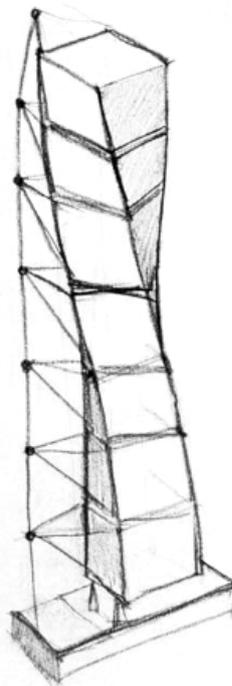
<sup>11</sup> COSTA, Mauro - *Analogias Biológicas en la Arquitectura – Del acercamiento biónico hacia los paradigmas de lo biodigital*. p.28.

<sup>12</sup> SONGEL, Juan Maria - *Frei Otto. Conversación con Juan Maria Songel*. p.25. [trad. do a.].

Elaboración de la estructura de los aceros de  
Volcanes



Este del ojo para la interfase de modo  
representativa. Este de primera línea de visión



↖ Fig.18 Esboço de Calatrava do Observatório.

↓ Fig.20 Observatório da Cidade das Artes e Ciências.

↗ Fig.19 Esboço de Calatrava da Torre Torso.

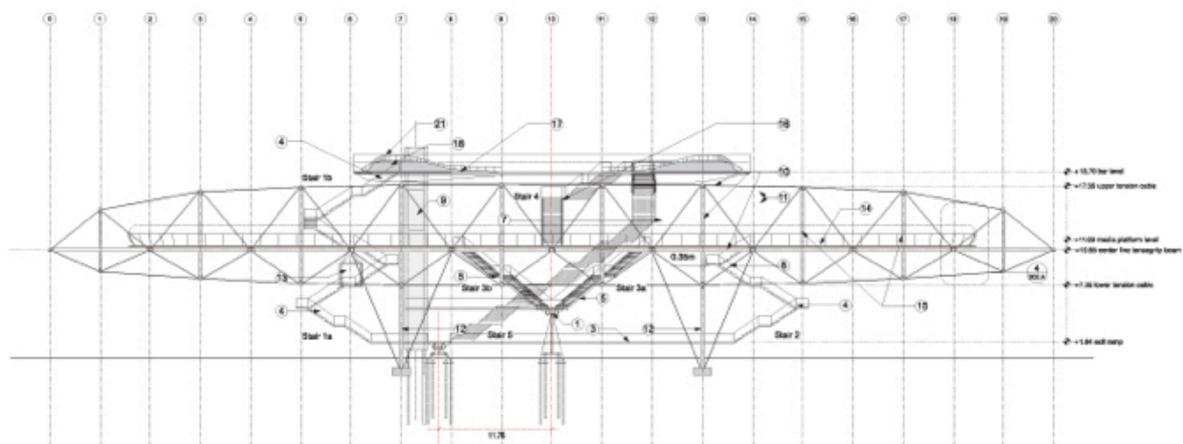
e tecnologias capazes de resolver os problemas e exigências necessárias de uma sociedade futurista. Dos vários projectos e ideias que apresentaram de forma muito própria queremos destacar o projecto *Walking City*. Possuidor de grande ambição, este projecto, tal como o nome indica, procura criar uma “cidade andante” capaz de resolver o problema da mobilidade. Esta mega-estrutura auto-suficiente, de 400 metros de comprimento e 220 metros de altura, seria capaz, não só de oferecer *habitat* para o Homem, como mover-se e conquistar a terra, o mar e, levando o conceito ao extremo, o espaço. Na *Walking City* é visível a analogia de um organismo capaz de mover-se com suas pernas mecânicas, morfologia muito semelhante à de um insecto. Este biomorfismo surge pela primeira vez em grande escala – a cidade – atribuindo a algo estático a capacidade de ganhar vida e mobilidade, onde nós, humanos, habitaríamos espalhados pelo mundo.

Actualmente, possuímos vários exemplos arquitectónicos provenientes do universo biológico. Este universo é hoje explorado, tanto a nível morfológico, como ao nível de mecanismos, soluções, ou materiais provenientes da exploração biológica.

Um dos arquitectos que se destaca neste panorama, é o espanhol Santiago Calatrava. O edifício do observatório da *Cidade das Artes e Ciências*, em Valência, revela não só um biomorfismo morfológico do olho humano, como o seu mecanismo de abertura da fachada replica o funcionamento do olho humano. Outro exemplo biomórfico de Calatrava, é a *Torre Torso*, em Malmö, Suécia. A sua composição morfológica reproduz o movimento de torção do corpo humano, oferecendo um elegante movimento giratório e uma qualidade distintiva ao edifício.

Outro exemplo é o projecto *Blur Building*, realizado por Diller e Scofidio para a *Expo 02* na Suíça. O *Blur Building* revela uma nova tendência desmaterializadora da forma arquitectónica. Este projecto pode ser equiparado a uma nuvem, em que o edifício suspenso acima do nível do lago Neuchatel possui um alçado composto essencialmente por uma nuvem de água. Neste caso específico, embora seja planificado segundo o desenho técnico, o resultado final de fachada difere dos pormenores construtivos do edifício. No final, apenas podemos apreciar uma bela nuvem de água que se molda ao “sabor” do vento.

Outros trabalhos poderiam ser aqui referenciados, de forma extensa e aprofundada, mas no entanto pretendem-se outros objectivos ao longo deste estudo. A

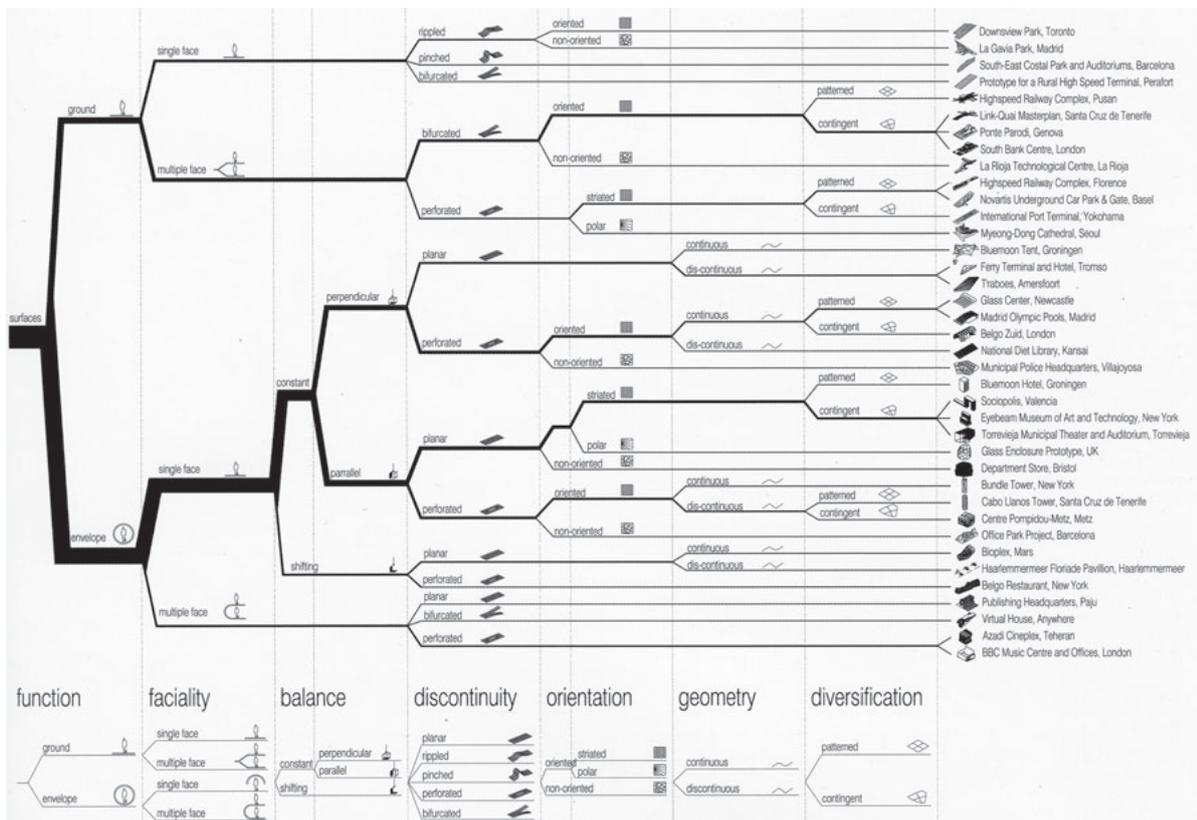
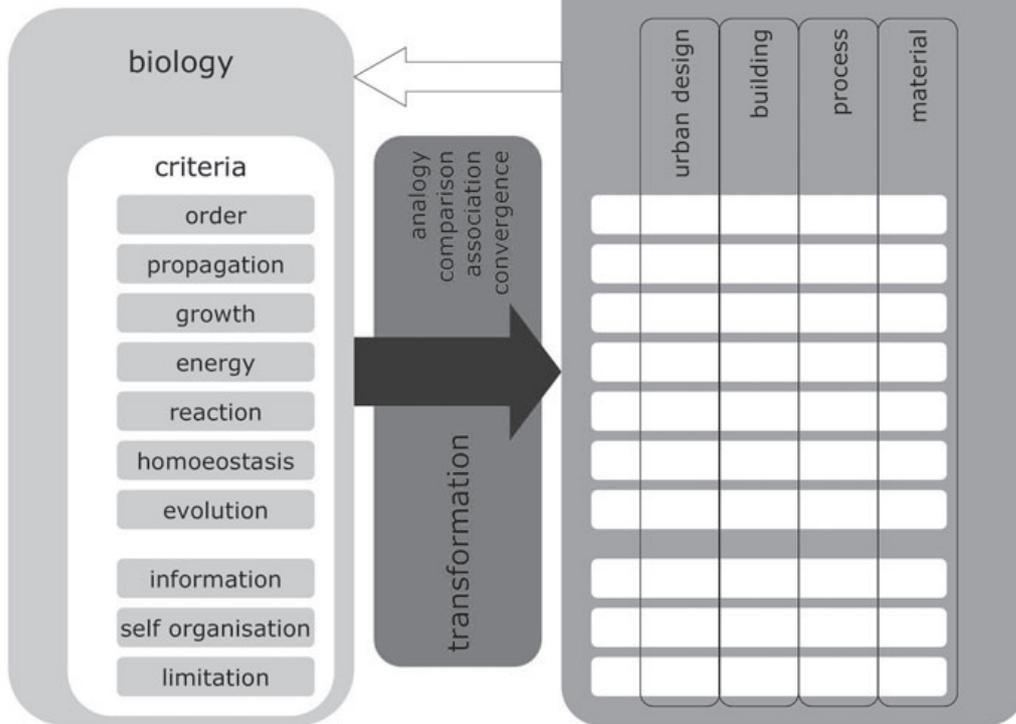


↑ Fig.21 Secção longitudinal do projecto *Blur Building*.  
 ↓ Fig.22 *Blur Building* da EXPO 02 na Suíça.

pertinência deste capítulo centra-se apenas em demonstrar como o universo biológico tem servido de inspiração ao longo da História da Humanidade. Através de várias eras tecnológicas e artísticas, os modelos e soluções naturais foram responsáveis pela estética, por novos avanços científicos e inventos.

Independentemente do conhecimento reunido ao longo das diferentes épocas, como dos diferentes contextos culturais presentes na História da Humanidade, a Natureza tem-se revelado como um elemento capaz de gerar e oferecer infinitas fontes de inspiração a distintas áreas, sendo uma delas a Arquitectura. Importa-se pois tentar perceber que ciências ligadas à Biologia poderão assistir a disciplina da Arquitectura.

**criteria**



↑ Fig.23 Diagrama elucidativo da relação entre Arquitectura e Biologia (critérios e campos aplicativos).

↓ Fig.24 Árvore filogenética utilizada como exercício de desenvolvimento evolutivo pelos *Foreign Office Architects*.

## 1.2. “Bio-lógicas” na Arquitectura

Vivemos num período de evolução, em que a Máquina, a Tecnologia, e a Ciência continua a expandir os nossos horizontes. Os limites são elevados constantemente, originando novas soluções tecnológicas capazes de exprimir o actual conhecimento humano .

Paralelamente a este *boom* exponencial, o Homem restabelece uma antiga e perdida ligação com o universo biológico, por intermédio do qual novas ideias, funções, materiais e processos renovam os vários campos tecnológicos dos tempos em que vivemos. Este universo biológico revela que, mesmo muito antes do Homem criar soluções, já a Natureza dava origem a “alta tecnologia” capaz de responder a diferentes fins. Optimização de espaços compactos, impermeabilização, controlo de temperatura, a construção de um habitat ou estruturas capazes de reflectir mecanismos e ordem “social”, são alguns dos exemplos reveladores de uma natureza capaz de resolver algumas das necessidades e problemas do nosso dia a dia. Embora todo este conhecimento tenha existido ao longo da evolução terrestre, apenas parte dele tem sido aproveitado, e a outra parte ficado esquecida ou mesmo ignorada.

Surge assim uma nova oportunidade capaz de poupar a necessidade e dificuldade de inventar, a qual pode, em muitos casos, ser substituída pela observação e constatação de soluções biológicas. No entanto, não defendemos que a imitação de soluções biológicas seja a única e/ou melhor solução, ou ainda que substitua a nossa brilhante capacidade de inventar. Apenas acreditamos, que em muitos casos e perante certos desafios, a observação deste mundo biológico poderá ser de grande ajuda para as ciências humanas.

A sua presença na Arquitectura surge através da aplicação de analogias provenientes do universo biológico. Estas, com diferentes estratégias, soluções e informação, devem ser diferenciadas, permitindo uma melhor compreensão da sua aplicação às diferentes áreas e com especial destaque na Arquitectura. Assim, procuramos identificar e diferenciar o uso de diferentes “conhecimentos” biológicos - **Biónica**, **Biomimética** e **Biotecnológico** - permitindo uma melhor compreensão e distinção entre as várias áreas.



### 1.2.1. Biónica

“A Biónica é considerada uma ciência de conexão e por isso contrasta em metodologia e objecto de estudo das ciências analíticas.”<sup>13</sup>

Mauro Costa

A palavra biónica surge da união entre a palavra grega *Bios* e o sufixo latino *ico/a* significando, respectivamente, *vida* e *em relação a* ou *ciência de*, que se refere a toda a construção artificial baseada em modelos de sistemas vivos.<sup>14</sup>

A Academia Real define a palavra Biónica através da união da palavra *Bios* e *electrónica*, sendo um termo relacionado com a área da Cibernética. Mas é em Agosto de 1958, através do Major Jack E. Steele<sup>15</sup> da *Divisão Médica Aeroespacial da Aviação* dos E.U.A. que surge pela primeira vez a palavra *Biónica*. Segundo Jack Steele a Biónica é uma “*Ciência de sistemas possuidores de um funcionamento copiado aos sistemas naturais ou que apresentam características específicas destes sistemas naturais ou análogos a estes*”.<sup>16</sup> Através da *United Air Force*, este conceito clarificou-se com os estudos feitos por biólogos, físicos, engenheiros, matemáticos entre outros, contribuindo para o desenvolvimento deste campo.

Posteriormente, Franco Lodato, designer industrial e professor da Universidade de Montreal, define assim a Biónica: “*A assimilação de princípios de engenharia utilizados em sistemas naturais para aplicação ao desenho ou à melhoria de sistemas tecnológicos*.”<sup>17</sup> Esta doutrina ganha um novo destaque nas várias áreas, sendo a Arquitectura uma delas.

---

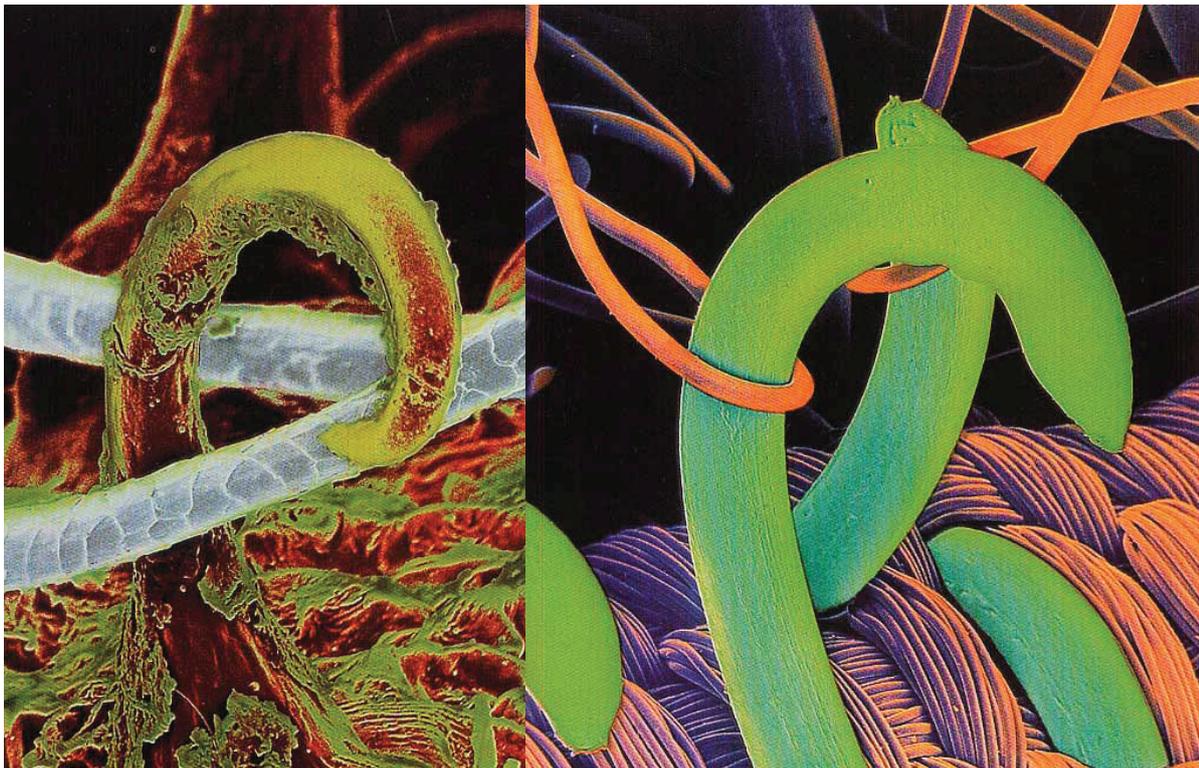
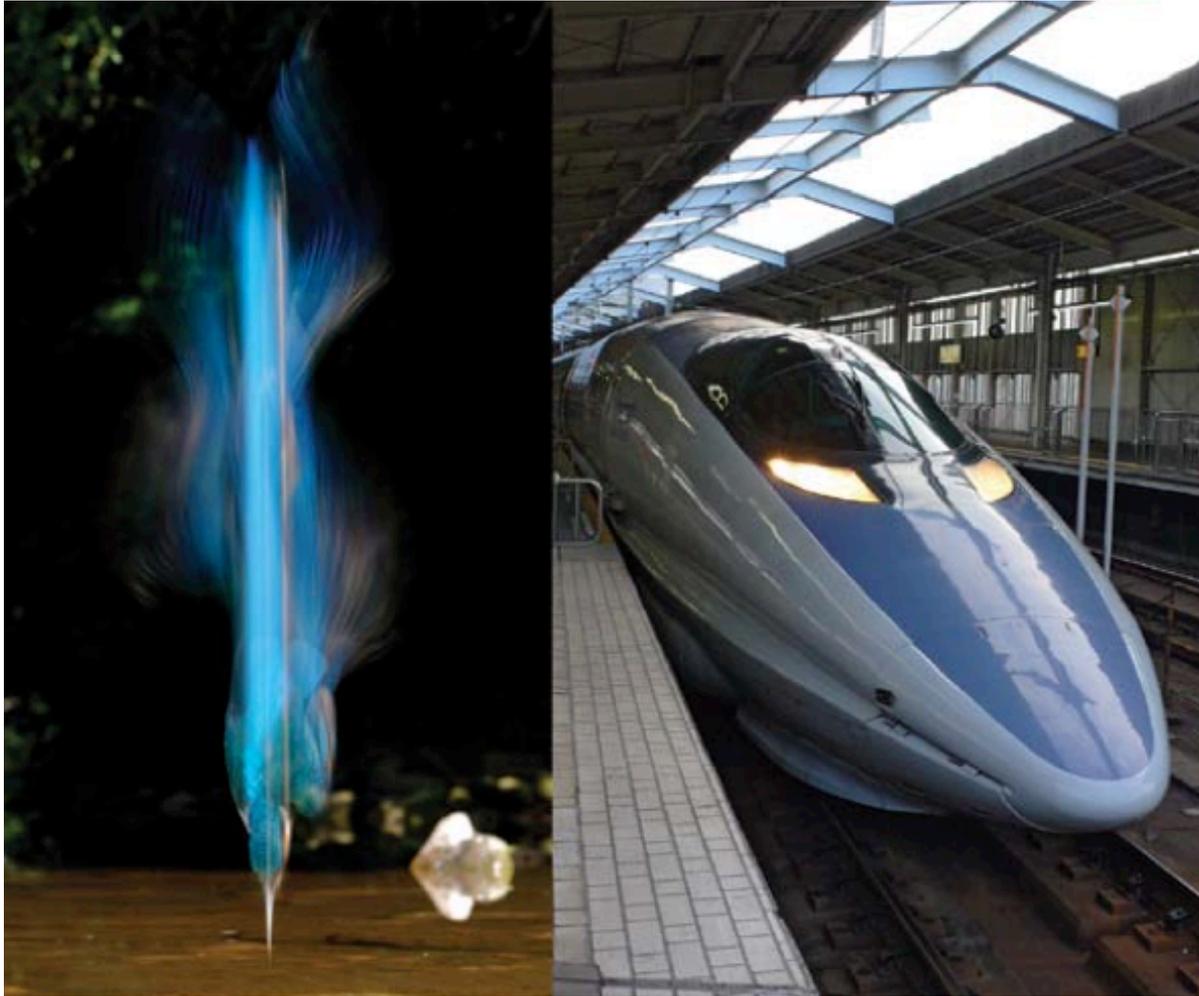
<sup>13</sup> COSTA, Mauro - *Analogias Biológicas en la Arquitectura – Del acercamiento biónico hacia los paradigmas de lo biodigital*. p.28. [trad. do a.].

<sup>14</sup> COSTA, Mauro - *Analogias Biológicas en la Arquitectura – Del acercamiento biónico hacia los paradigmas de lo biodigital*. p.25.

<sup>15</sup> Jack E. Steele (1924-2009), também reconhecido como o mentor da Biónica, constituiu uma carreira multidisciplinar na área das Ciências. Formado em Engenharia Geral e Medicina (1942-44 e 1950 respectivamente), serviu o *U.S. Army* durante o período de 1943-46 e, posteriormente, o *U.S. Air Force* desde o ano 1951 até à sua reforma em 1971. Durante a sua carreira militar investigou os efeitos do stress de movimentos, de sons e de rajadas de vento, tal como a aplicação de modelos biológicos à engenharia aeronáutica.

<sup>16</sup> Cf. GERARDIN, Lucien - *La biónica*. p.11.[trad. do a.].

<sup>17</sup> LODATO, Franco - *Bionica: la naturaleza como herramienta de innovación*. p.47. [trad. do a.].



↑ Fig.25 A morfologia aerodinâmica do comboio de alta velocidade *Shinkansen* baseada no bico do pássaro Martin-Pescador.

↓ Fig.26 A invenção do velcro deriva do estudo da planta *Galium Aparine*.

No entanto, a oficialização deste termo surge pela primeira vez com a *Annual National Aeronautic Electronics Conference*, realizada nos princípios de Maio do ano de 1960. Segundo a presidência de John E. Keto, médico da *U.S. Air Force*, são expostos quatro trabalhos como resultado de um programa de investigação do Centro Wright-Patterson da *U.S. Air Force*, consagrando pela primeira vez o termo *Biónica*.

Mais tarde, o conceito *biónico* invade finalmente a Arquitectura, sendo este um processo incontornável face às descobertas realizadas essencialmente nas várias áreas da Engenharia. Em 1961, Frei Otto (1925 - ) é o primeiro Arquitecto a mencionar o conceito *Bioarquitectura*, descrevendo-o como a “[...] aplicação de analogias provenientes da Natureza para o desenvolvimento de sistemas construtivos e estruturas arquitectónicas”<sup>18</sup>. A sua investigação ocorre maioritariamente em Stuttgart, Alemanha, onde Otto participa em vários grupos de investigação multidisciplinares, os quais têm como principal objectivo o estudo de estruturas ligeiras através do uso das diversas técnicas provenientes de construções naturais. Apesar de não intitular-se como arquitecto biónico, a sua direcção e a aplicação de analogias presentes na Natureza revelam a intenção clara de uma “aplicação biónica” à Arquitectura.

Finalmente, é em publicações dos anos 80 que é oficializado o conceito *Biónica*, permitindo um novo rumo na Arquitectura. Surge, assim um novo conhecimento capaz de oferecer novas soluções face aos problemas do design e de especial interesse do arquitecto, apoiado num complexo sistema evolutivo natural, o qual permitirá atingir novas respostas para as suas necessidades de projecto.

A aplicação desta ciência parte da observação dos seres vivos e de fenómenos naturais, como da análise das suas características e funções condescendentes ao desenvolvimento de técnicas ou soluções que possam ser aplicadas a artefactos, funções ou novas ideologias do universo arquitectónico. Não é por acaso que um avião possui a forma de um pássaro, um submarino a de um peixe, ou do *Parque Olímpico de Munique* de Frei Otto, cuja configuração é semelhante à teia de uma aranha. Estes são alguns dos inúmeros exemplos criados pelo Homem, os quais, através das diferentes Eras, apoiaram-se no mundo natural, para desenvolver e vencer certas funções e/ou dificuldades necessárias à natureza Humana.

---

<sup>18</sup> Cf. COSTA, Mauro - *Analogias Biológicas en la Arquitectura – Del acercamiento biónico hacia los paradigmas de lo biodigital*. p.27. [trad. do a.].



↑ Fig.27 Investigação biônica realizada em cooperação com o Instituto de Desenho Computacional (ICD), o Instituto de Estruturas de Edifícios e Desenho Estrutural (ITKE) e os alunos da Universidade de Stuttgart, durante o Verão de 2011.  
↓ Fig.28 O Pavilhão desenvolveu-se a partir do estudo da espécie bolacha-da-praia, da classe *Echinoidea*.

Estes conhecimentos biónicos, aplicados segundo o uso recorrente de analogias, pode manifestar-se nas diferentes componentes do “objecto” arquitectónico ou de design. Embora o conceito de analogia seja aprofundado no capítulo 1.4, Franco Lodato distingue as analogias biológicas da seguinte forma:

*Imitação completa* - um objecto, material ou estrutura idêntica ao produto natural

*Imitação parcial* - a versão modificada de um produto natural.

*Sem parecer biológico* - quando a função é imitada de um produto natural.

*Abstracção* - a utilização de um mecanismo isolado.

*Inspiração* - quando a Biologia é responsável pela criatividade envolvente no processo criativo.<sup>19</sup>

Relativamente à Arquitectura e especificamente aos edifícios de carácter zoomórfico, Hugo Aldersey-William fornece uma melhor compreensão da aplicação da metodologia biónica às diversas obras. Assim, distingue os três grupos de obras biomórficas mais comuns à Biónica:

1. Edifícios que incluem referências biológicas com fins simbólicos;
2. Edifícios onde a inspiração biológica surge como uma consequência mais ou menos lógica do programa;
3. Edifícios que parecem ter qualidades biológicas, mesmo sem ser a intenção consciente do autor.<sup>20</sup>

Lodato defende a aplicação da Biónica ao desenho como a primeira metodologia aplicada durante o processo de design. Esta afirmação fundamenta-se na observação de obras humanas, tais como abrigos, casas e até a forma como o Homem conquistou outros ambientes, nomeadamente o ar e os oceanos.

*“A primeira conquista do ar e dos oceanos foi possível graças à utilização do desenho biónico como ponto de partida para os objectos que deveriam recorrer a esses meios.[...] Também não se deve desdenhar que estas adaptações de desenho foram feitas com um conhecimento científico muito escasso, se é que havia algum, da dinâmica*

---

<sup>19</sup> LODATO, Franco - *Bionica: la naturaleza como herramienta de innovación*. p.47- 48. [trad. do a.].

<sup>20</sup> ALDERSEY-WILLIAMS, Hugh – *Zoomorphic: New Animal Architecture*. p.22. [trad. do a.].



↑ Fig.29 Os vários níveis do Projecto *Lily Pad* de Vincent Callebaut.

↓ Fig.30 O projecto é inspirado na planta *Vitória-Régia* da família *Nymphaeaceae*. Esta estrutura híbrida flutuante surge como possível solução sustentável face ao actual problema ecológico da subida do nível do mar. Vista panorâmica do projecto.

*dos fluidos. Os pioneiros no desenho apenas aplicaram a convicção de que a forma destas máquinas viventes era a que melhor se adaptava para a sua função no seu entorno.*”<sup>21</sup>

Segundo Franco Lodato a aplicação e planeamento do desenho biónico pode ser dividido em quatro fases:

1. Selecção das características de um organismo vivo capaz de superar as actuais propostas de desenho.
2. Detecção e obtenção dos princípios e processos que outorgam essa superioridade.
3. Elaboração de métodos e modelos para descrever os sistemas biológicos em meios úteis para os desenhadores.
4. Demonstração da viabilidade capaz de traduzir este conhecimento num elemento artificial.<sup>22</sup>

Geoffrey Broadbent acaba por direccionar este estudo à Arquitectura, reduzindo a sua aplicação às etapas e métodos a que o arquitecto recorre durante a projecção de um espaço . Assim, dividiu este processo nos seguintes métodos:

*Método canónico* - Quando encontra a forma na geometria e seus cânones.

*Método pragmático* - Quando chega a formas através de um processo azarado de experimentação, tentativa e erro.

*Método icónico* - Quando se obtêm a forma inspirada noutras formas ou imagens arquitectónicas já existentes.

*Método analógico* - Quando se utilizam formas externas no mundo da Arquitectura, convertendo-as em formas arquitectónicas.<sup>23</sup>

Segundo Litinetski, *“A Biónica é uma ciência interdisciplinar ou, como se costuma dizer, uma ciência de cruzamento. Está formada sob a base das ciências naturais e das*

---

<sup>21</sup> LODATO, Franco - *Bionica: la naturaleza como herramienta de innovación*. p.48. [trad. do a.].

<sup>22</sup> *idem*.

<sup>23</sup> Cf. COSTA, Mauro - *Analogías Biológicas en la Arquitectura – Del acercamiento biónico hacia los paradigmas de lo biodigital*. p.27. [trad. do a.].



*infinitas ciências da engenharia. A sua essência sintetiza os conhecimentos acumulados na Biologia, Cibernética, Física, Psicologia, Biofísica, Construção, etc.”*<sup>24</sup>

A sua metodologia científica revela-se capaz de reunir áreas, soluções ou matérias de diferentes áreas do conhecimento humano, reutilizando a Natureza num plano científico, filosófico, inclusive artístico, que oferecem à Arquitectura uma multidiversidade de soluções. Através dos recursos digitais actuais - componente essencial para a formulação de analogias biónicas na Arquitectura - é possível converter as soluções biológicas em objectos arquitectónicos dotados do rigor presente nos modelos naturais.

No entanto, esta multidiversidade de soluções e métodos exige um grande controle e um profundo conhecimento, permitindo ao investigador identificar e interpretar os sistemas vivos presentes no mundo biológico, sendo estes mais complexos do que as nossas criações. Citando novamente Litinetski: “[...] *para conhecer a estrutura, os princípios de funcionamento biológico, modelação e construção mecânica, é necessário que o investigador possuir conhecimentos universais.*”<sup>25</sup>

O principal potencial biónico, segundo o nosso ponto de vista, deve-se à longa evolução de biliões de anos da vida terrestre, na qual a forma e função foram optimizadas de acordo com as necessidades cruciais de cada elemento. Os diferentes parâmetros de funcionalidade, optimização, efectividade e baixo custo, são estabelecidos segundo um critério incorruptível, capaz de desenvolver um ser, objecto ou material despido de falsos valores.

*“Se o seu objectivo é a «abstracção dos bons desenhos da Natureza» para convertê-los em soluções práticas, todas as disciplinas poderão contribuir em algo e, conseqüentemente, o êxito apenas poderá surgir da interacção e integração.”*<sup>26</sup>

Esta capacidade de seleccionar e filtrar condicionantes desnecessárias pode possibilitar uma nova linguagem, capaz de conduzir a Arquitectura para um caminho

---

<sup>24</sup> LITINETSKI, IB - *Iniciación a la Biónica*. p.24. [trad. do a.].

<sup>25</sup> LITINETSKI, IB - *Iniciación a la Biónica*. p.23. [trad. do a.].

<sup>26</sup> COSTA, Mauro - *Analogias Biológicas en la Arquitectura – Del acercamiento biónico hacia los paradigmas de lo biodigital*. p.30. [trad. do a.].



mais racional, objectivo e claro, eliminando condicionantes despropositadas ou *clichés* arquitectónicos, que ainda prevalecem nos dias de hoje.

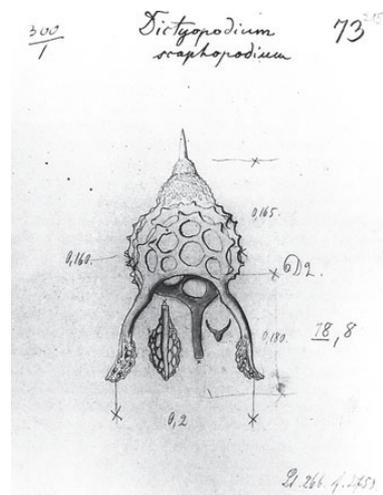
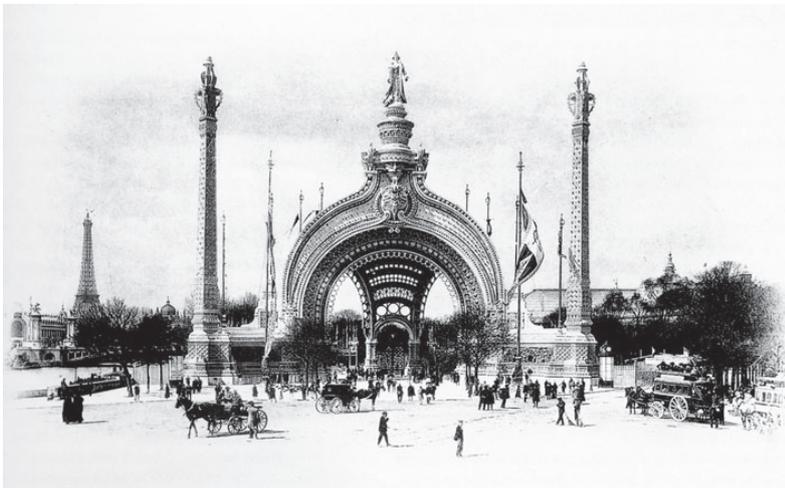
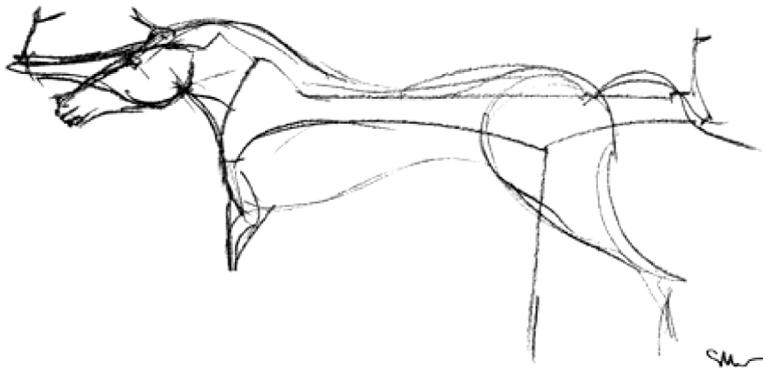
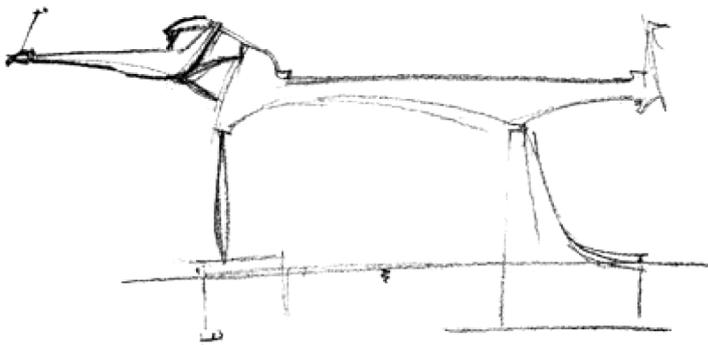
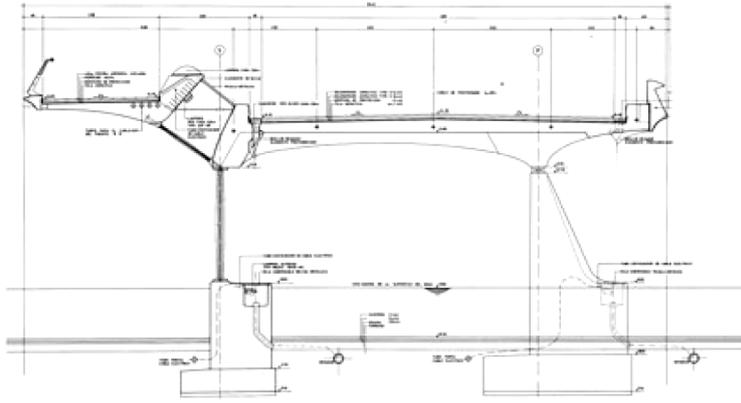
É de salientar que este universo de inspiração natural não deve conter-se apenas ao mundo animal, mas também abranger alguns dos vários fenómenos naturais presentes no nosso planeta. A sua justificação passa por estarem, em muitos casos, directamente interrelacionados, originando e influenciando desta maneira o mundo dos seres vivos através de diferentes e específicos fenómenos naturais. O processo auto-generativo responsável pela criação da Terra há 3,5 biliões de anos passa a constituir uma valiosa fonte de informação capaz de ajudar o Homem nas várias áreas, nomeadamente a Arquitectura.

Apesar do potencial biónico revelar-se explicitamente, é todavia necessário conhecê-lo melhor, saber identificar problemas e investigar soluções capazes de interferir de forma benéfica. Para esse efeito voltaremos a reutilizar o pensamento de Litinetski, pelo qual só na posse de conhecimentos universais é que é possível traduzir estas soluções naturais em resultados positivos. Este sucesso parte da relação existente entre os conhecimentos adquiridos, com a capacidade de analisar e reproduzir as soluções naturais e, conseqüentemente, atingir uma harmonia entre forma e função. Esta harmonia também está presente na Arquitectura e, se a reduzirmos a um expoente máximo de abstracção, será possivelmente a única grande verdade e objectivo da Arquitectura. Este objectivo essencial para a prática arquitectónica também pode evoluir, se observarmos os produtos da Natureza.

Na Natureza a relação entre forma e função é apurada de forma “inteligente”, sendo capaz de descodificar os parâmetros realmente necessários para um fim específico. Julian Vicent, do Centro de Biomimética da Universidade de Reading, afirma que “[...] qualquer organismo biológico tem uma quantidade limitada de energia proveniente essencialmente ou do Sol, ou da Terra, estando todos os organismos competindo entre eles por esta mesma energia”<sup>27</sup>. Em consequência desta competição, a função e forma são apuradas para uma sobrevivência específica, capaz de dar respostas à necessidade primordial de sobreviver. Torna-se evidente a relação e distribuição da energia entre a forma, o material e os mecanismos utilizados para uma determinada causa, oferecendo novas soluções para o Homem. A Natureza surge assim

---

<sup>27</sup> VINCENT, Julian - *Borrowing the best from Nature*. p.169. [trad. do a.].



↑ Fig.31 Esboço da Ponte 9 de Outubro de Santiago Calatrava, em Valência.

↙ Fig.32 Desenho para a entrada monumental da Exposição Mundial de Paris de 1900, por René Binet.

↘ Fig.33 Desenho de um radiolário por Ernst Haeckel.

com uma variedade de materiais, formas e funções capazes de não só combater a falta de coerência existente nas diversas áreas do design, como também equilibrar uma nova relação energética entre o objecto e a função, tornando um fim específico mais eficaz.

Acreditamos que esta “nova” visão pode completar o mundo da Arquitectura, possibilitando um novel ponto de vista mais orgânico, evolutivo e apoiado num novo conjunto de valores de carácter tendencialmente biológico. A aplicação de uma “selecção natural” arquitectónica fará todo o sentido sempre que esta melhore e esteja em sintonia com a boa prática de uma arquitectura racional, funcional e bela. Reduzirmos a essência ao mínimo, não só num acto minimalista “Miesiano”, mas até à verdadeira questão da sua existência, passa por descobrir realmente a necessidade de existência de um determinado objecto arquitectónico e de determinar qual será o seu fim.

### 1.2.2. Biomimética

A Biomimética é uma área emergente que pretende estudar soluções presentes no mundo natural, e cujo potencial permita resolver os problemas de desenho contemporâneo e/ou engenharia. Afirma-se como uma ciência capaz de aprender com a Natureza, com as suas funções e estruturas biológicas, modelos e padrões, aplicando seus conhecimentos às diferentes áreas da escala humana, entre elas o Design e a Arquitectura. De acordo com Klein, B.M. Katz, a Biomimética define-se como o estudo dos processos naturais e de como estes podem ser emulados para a resolução de problemas humanos de forma *life-friendly* e *waste-free*.

Deve-se mencionar que *biomimética*, também reconhecida como *biomimesis*, provém do grego *bios*, vida e *mimesis*, imitação. As suas origem, conceito, metodologia e bases de investigação (facilmente confundíveis com os da Biónica) surgem na década de 1950 por Otto Schmitt.<sup>28</sup> Em 1969 a palavra biomimética dá origem ao título de um

---

<sup>28</sup> Otto H. Schmitt (1913-1998) foi um inventor americano, professor, engenheiro e biofísico reconhecido pelo seu contributo às áreas da Biofísica, da Engenharia Biomédica e da Engenharia Eléctrica. Das suas variadas invenções devemos destacar o *Schmitt Trigger*: um circuito electrónico capaz de converter sinais analógicos em digitais. Este conversor está presente em qualquer computador, tal como qualquer aparelho electrónico. O *Schmitt Trigger* constituiu uma das descobertas elementares para a vasta tecnologia computacional da actualidade.



artigo de Schmitt e finalmente, em 1974, é publicada no dicionário de Webster com a seguinte definição:

*“O estudo da formação, estrutura ou função de substâncias e materiais biologicamente produzidos [como as enzimas ou a seda], e mecanismos e processos biológicos [como a sintetização de proteínas ou de fotossíntese] especialmente para os propósitos de sintetização de produtos similares por mecanismos artificiais que mimetizam os naturais.”<sup>29</sup>*

Tal como outras áreas, a Biomimética é uma área multidisciplinar com diversas sinergias em diferentes campos, tais como biologia, química, informática, matemática, electrónica, além de outros. Estas sinergias surgem da necessidade de reunir diferentes conhecimentos capazes de reproduzir mecanismos e tecnologias presentes num universo infinito de soluções biológicas. Este *catálogo* natural, constituído por milhões de espécies (das quais apenas menos de dois milhões se encontram catalogadas) revela a infinidade de soluções e informações à nossa disposição.

*“[...] uma nova forma de observar e avaliar a natureza, introduzindo uma nova era baseada não só no que podemos extrair do mundo natural, como no que podemos aprender deste.”<sup>30</sup>*

Assim, o seu estudo foca-se na aprendizagem e observação da Natureza, em que sistemas biológicos são “copiados” e aplicados a problemas similares às diferentes áreas. Estas soluções têm vindo a contribuir para a evolução de vários campos de investigação e de vários elementos, nomeadamente estruturas, materiais, mecanismos e processos. Também têm contribuído para uma melhor compreensão de variantes, tais como comportamento e controlo, sensores e comunicação, sobrevivência e adaptabilidade, originando uma melhor adaptação da natureza humana, dos seus mecanismos e das suas necessidades ao meio ambiente.

---

<sup>29</sup> Cf. VINCENT, Julian V. F. [et al.] — *Biomimetics: its practice and theory*.p.471. [trad. do a.].

<sup>30</sup> BENYUS, Janine M. — *Biomimicry: Innovation inspired by Nature*. p.1. [trad. do a.].



↑ Fig.34 Casa Nautilus baseada na morfologia do nautilus por Javier Senosiain.  
↓ Fig.35 Casa Tubarão por Javier Senosiain.

Julian Vincent, zoólogo e engenheiro, dedica-se ao estudo de sistemas e estruturas de origem biológica, procurando atingir um equilíbrio entre ecologia, economia e engenharia, pelo que constitui uma figura central neste ramo científico.

Segundo o mesmo autor, a biomimética “[...] *pode ser definida como a implementação dos princípios do design derivados da biologia. Estes princípios podem ser aplicados, literalmente, com uma aproximação biomórfica ou, podem ser aplicados com uma aproximação orientada em direcção aos sistemas. Quanto mais abstracto for a derivação, mais importante se torna o reconhecimento dos padrões nos dados, ao invés das formas dos objectos físicos. A abstracção, portanto, simplifica a transferência da tecnologia enfatizando os principais princípios a serem usados e, assim, tornam a tecnologia mais poderosa e penetrante: poderosa porque introduz técnicas dos sistemas biológicos dum modo adaptativo; penetrante porque este modo adaptativo torna mais fácil misturar a aproximação biológica com a engenharia convencional.[...] O objectivo é produzir engenharia que possua atributos básicos de sistemas biológicos tais como o consumo de baixa energia, reciclagem facilitada, durabilidade extrema e versatilidade instantânea a partir poucos materiais disponíveis.*”<sup>31</sup>

A Biomimética na Arquitectura reflecte-se essencialmente por um processo de mimesis da Natureza, em que a complexidade cultural contemporânea e uma abordagem científica do natural (segundo o conceito de sinergia) dão origem a novas soluções. Embora através dos séculos tenha sido aplicada de forma diferente, este processo de imitação – a mimesis – adquiriu um vasto conjunto de significados ao longo da história da Arquitectura. A mimesis surge em vários momentos com significados distintos, como a imitação, inspiração, aprendizagem ou recriação de sistemas biomiméticos. Acontecimentos provenientes do reino natural, como a simetria, o ritmo ou modulação, foram aplicados em diferentes níveis e intensidades, reflectindo-se nos exemplos arquitectónicos desde a Antiguidade média até aos dias de hoje.

As manifestações artísticas sentidas na antiguidade revelavam já alguma prática desta mimesis. Embora as artes possuíssem um carácter mais naturalista da biomimesis, a arquitectura da antiguidade recorria a esta através de uma mimesis simbolista. Exemplos como as ordens clássicas e a representação metafórica do ser humano, desde

---

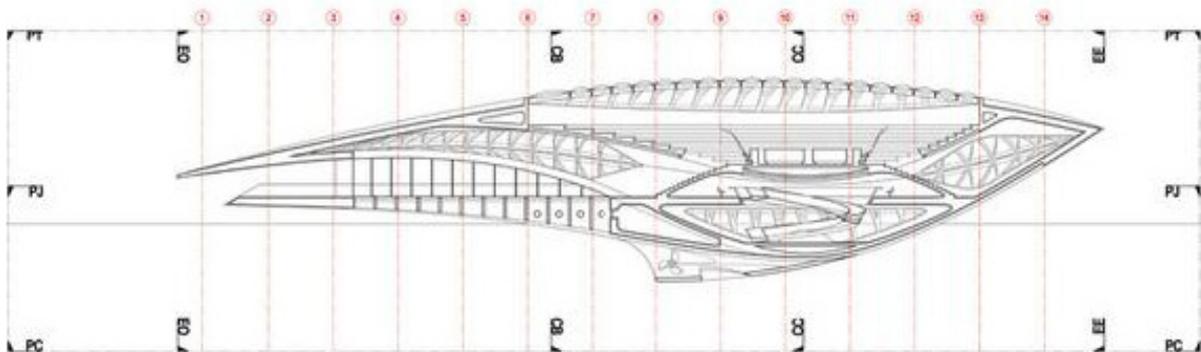
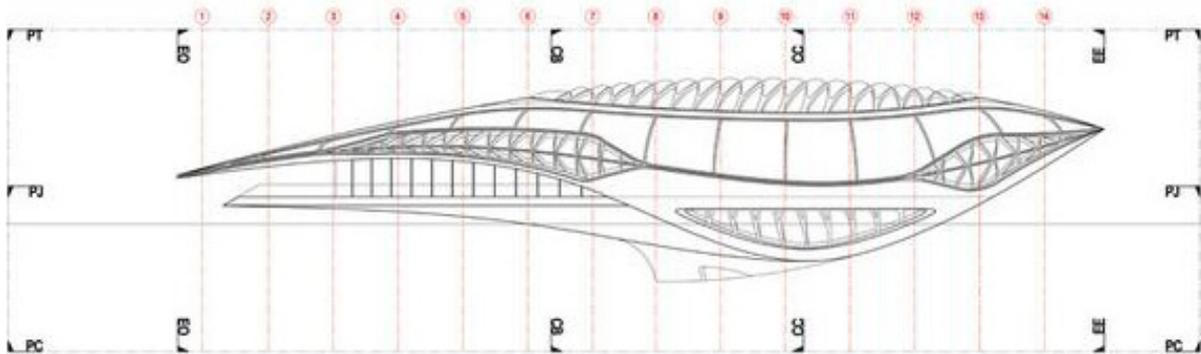
<sup>31</sup> “AD : Architectural Design”. London : Wiley Academy. 2009. 79:6. p. 76. [trad. do a.].



a robustez masculina da ordem dórica à delicadeza feminina da ordem jónica, revelavam já uma cópia de um elemento natural (neste caso o ser humano). Atributos da figura humana não só surgiam na caracterização das colunas, como também estavam presentes na sua composição. Os princípios de simetria, ordem e ritmo, sejam estes atribuídos ao corpo humano ou a elementos naturais (pois a Natureza é uma fonte infinita de simetrias, ordem e ritmo), fizeram parte dos elementos reguladores da arquitectura da antiguidade.

O Renascimento também revelou uma forte influência do universo natural, quer nas várias manifestações artísticas, quer na sua base filosófica. Ele representou a era do pensamento, do antropocentrismo, da redescoberta da antiguidade clássica, da observação e invenção, e afirmar-se-ia como uma “doutrina científica”, na qual o Homem foi o centro de todo o conhecimento renascentista. Consequentemente, a arquitectura do Renascimento, alicerçada nas proporções dos corpos naturais e nas harmonias da antiguidade clássica, revela um interesse especial pela representação da composição e da sua relação com a natureza física. O desenvolvimento e estudo desta era deram origem a uma relação dualista entre Arquitectura e Natureza. Por um lado, revela uma visão ilustrado-científica de um Homem supremo, intelectual, racional e regedor do conhecimento renascentista; por outro lado, demonstra a importância e a relação entre a Arte e a Natureza - fonte de soluções e mistérios capazes de influenciar as vanguardas e o pensamento renascentista. Surge uma nova relação entre o Homem e o mundo natural, que, através de um estudo científico e aprofundado do meio natural, foi capaz de criar novas visões e soluções nunca antes exploradas. Leonardo da Vinci é um dos grandes exemplos desta visão científica do natural concreto, a qual, através de analogias biológicas, originou novas descobertas dignas de um visionário sem precedentes.

A aplicação da mimesis veio a integrar-se de forma moderada, ao longo da história da Arquitectura. Inicialmente aplicada segundo um gesto pragmático da componente material e construtiva da Arquitectura, e posteriormente através do uso de analogias orgânicas, como os exemplos da antiguidade (Império Romano) ou do grande arquitecto florentino Alberti. Mais tarde aplicada à relação funcional e a elementos estruturais e, no século XIX, através de uma nova interpretação e invenção arquitectónica, que



↑ Fig.36 Caravela-Portuguesa (*Physalia physalis*).

↓ Fig.37 Alçado lateral e secção longitudinal do projecto *Physalia* de Vicent Callabaut. O projecto mimetiza as qualidades morfológicas e flutuantes da caravela-portuguesa.

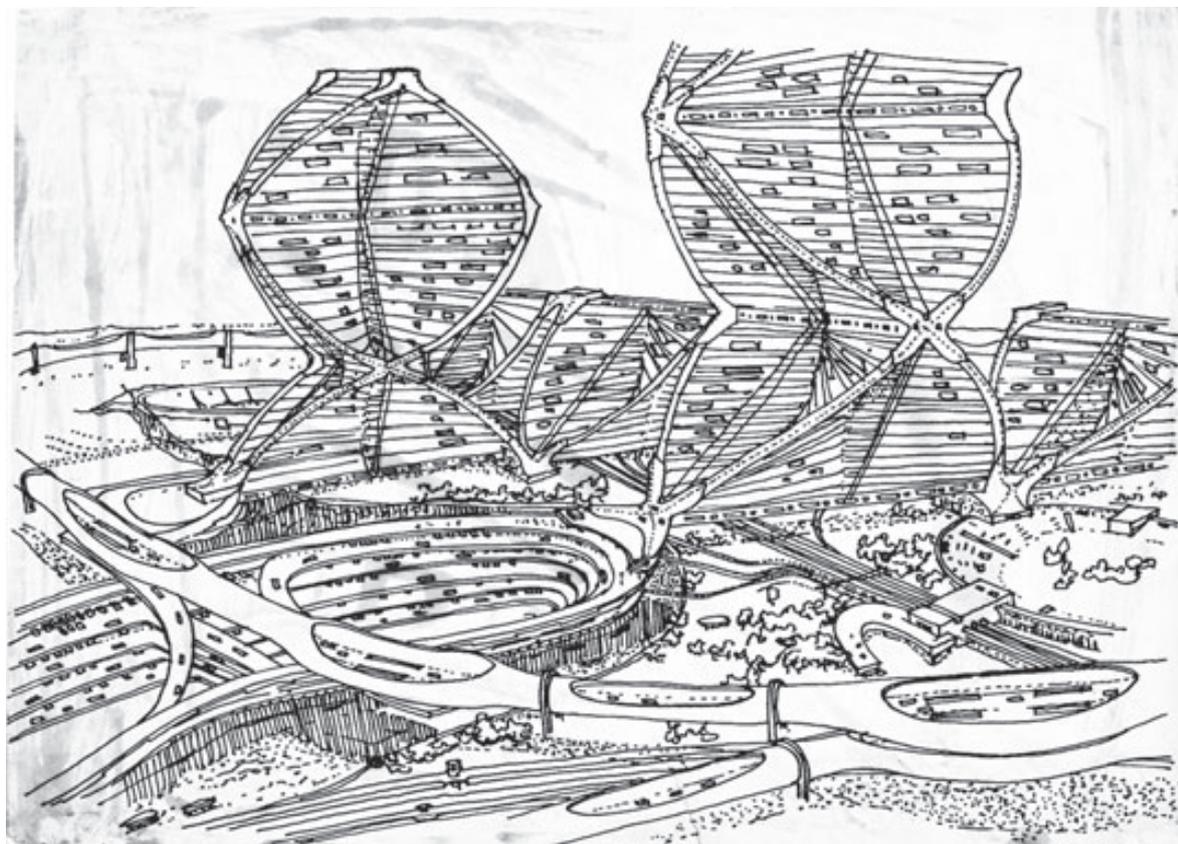
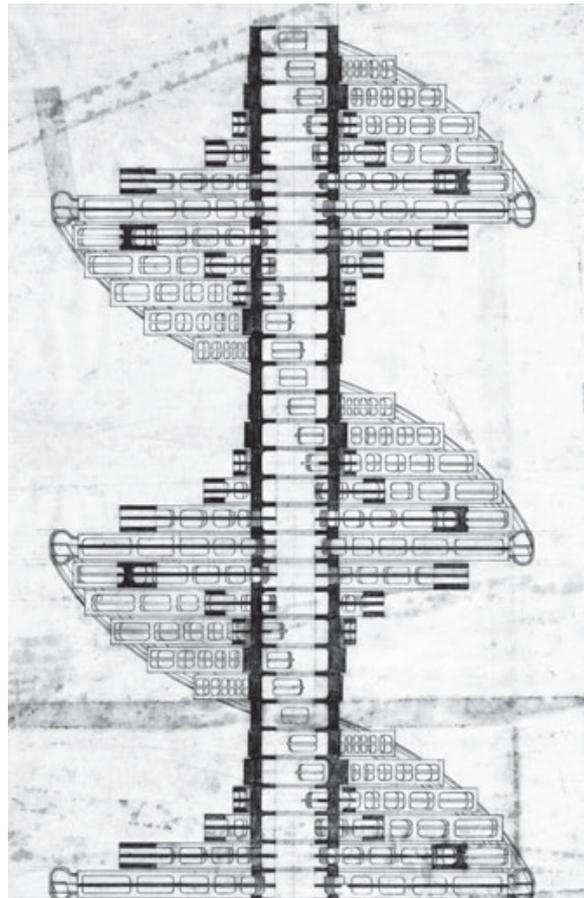
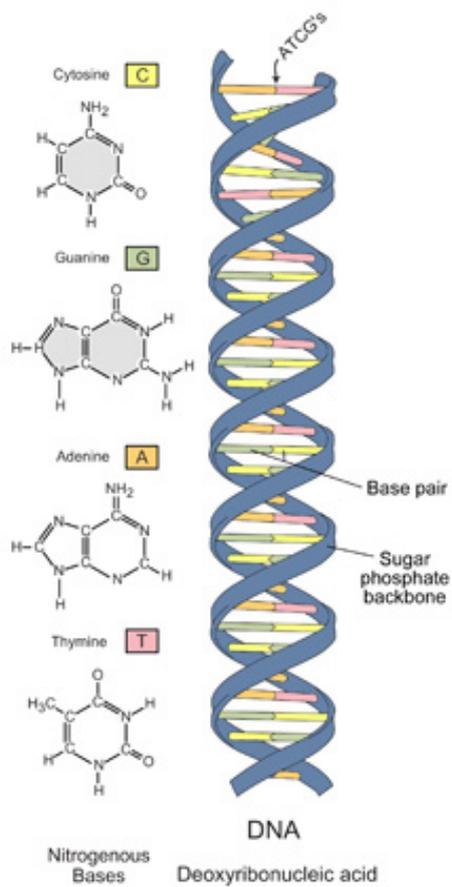
adquiriu novas dimensões e contextualizações diferentes segundo os vários estilos arquitectónicos deste período até ao século XX.

Na transição do século XX, o organicismo revelar-se-ia um novo instrumento na prática arquitectónica através do estilo internacional, no qual uma nova relação com a Natureza surge como elemento regulador da prática arquitectónica. Atributos como as formas orgânicas, as curvas sinuosas e elementos decorativos inspirados e copiados de elementos naturais invadem a arquitectura do século XX. O estilo *Art Déco* ou Arte Nova, liderado pelos principais arquitectos Victor Horta e Antoni Gaudí, revelaram uma exploração exaustiva da mimésis aplicada à Arquitectura. Esta foi aplicada maioritariamente à componente estética, mas também podemos encontrar uma aplicação funcional e caracterização do espaço, bem como em elementos estruturais e materiais da Arquitectura.

Actualmente, continuamos a encontrar exemplos de Biomimética na Arquitectura, embora com um suporte científico e uma aplicação mais racionalizada. A Arquitectura - disciplina que tem vindo a evoluir segundo novas doutrinas, novas racionalidade, funcionalidade, conceptualidade e também pelo crescimento das novas tecnologias - tem revelado novas estratégias e aplicações da mimesis com uma complexidade exponencial. Surge um novo olhar, um novo conhecimento capaz de traduzir e explorar soluções naturais, para dar origem a novos e mais elaborados exemplos arquitectónicos.

### 1.2.3. Biotecnológico

A Biotecnologia é uma área científica emergente, que tem originado novas tecnologias derivadas do conhecimento biológico obtido ao longo das últimas décadas. Este conhecimento tem sido aplicado a diferentes áreas científicas, e a evolução, por exemplo, da medicina, tecnologia analógica e virtual (tal como a nano-tecnologia, a robótica ou a inteligência artificial), ciência dos alimentos ou agricultura, tem gerado novas soluções biotecnológicas. Se considerarmos uma das múltiplas definições estabelecidas pela *Convenção de Diversidade Biológica* da ONU, a Biotecnologia consiste essencialmente na aplicação de sistemas biológicos, organismos vivos ou soluções



↖ Fig.38 Representação gráfica da dupla hélice de ADN.      ↗ Fig.39 Secção do projecto metabólico de Kisho Kurokawa.  
 ↓ Fig.40 Projecto do japonês Kisho Kurokawa inspirado na dupla hélice de ADN, em 1960.

provenientes destes a qualquer tecnologia<sup>32</sup>. Desta forma, o conhecimento obtido pela observação e experimentação do universo biológico surge como impulsionador de soluções, tecnologias, materiais ou serviços às várias vertentes científicas.

Seguindo uma visão abstracta, a Biotecnologia pode ser entendida como uma ciência capaz de utilizar e usufruir do universo biológico, traduzindo-se em novos resultados, técnicas, substâncias e produtos. Estes resultados têm convergido para um maior entendimento do universo natural e, por consequência, aplicados a diferentes finalidades científicas e tecnológicas, designadamente a Arquitectura.

Podemos dividir a Biotecnologia segundo dois conceitos gerais: a tradicional e a moderna. A biotecnologia tradicional pode ser avaliada e aplicada com observância dos *tradicionalismos* existentes, despidos de necessidades tecnológicas avançadas.

A biotecnologia moderna deriva da descoberta relativamente recente do ADN e da manipulação genética. A descoberta do ADN ou *ácido deoxyribose nucleico* surge em 1953, pela autoria de James Watson e Francis Crick, em que, pela primeira vez, facultou-se uma representação gráfica detalhada da constituição dos elementos provenientes do universo biológico. A partir da dupla hélice de ADN, surge uma nova visão estrutural capaz de demonstrar a constituição dos elementos naturais e, por consequência, permitir a manipulação da sua estrutura, originando novos resultados biológicos. Nasce assim a polémica e controversa era do gene e da genética, na qual o Homem ganha um novo conhecimento “manipulador”, aproximando-se dos deuses criadores da vida. Neste percurso, surgem novas áreas científicas, como a Biologia Molecular ou Genética e, por outro lado aprofundam-se conhecimentos nas áreas das ciências vivas (como por exemplo e especialmente na medicina).

A emergência biotecnológica proveniente da genética revelou novos horizontes na criação de novos elementos, espécimes e materiais. Hoje, é possível combater as fraquezas genéticas através da sua manipulação, como é o caso dos transgénicos na agricultura, ou a criação de novos biomateriais para diversas finalidades, desde as ciências vivas ao mundo da construção.

Esta revolução biotecnológica influencia essencialmente dois grandes pólos: a área da investigação e as comunidades que suportam esta; e a área da economia, onde a indústria e o mercado exploram e manufacturam as soluções provenientes da

---

<sup>32</sup> ONU - *Convenção sobre diversidade biológica*. p.2.



↑ Fig.41 Emergência de padrões ondulados modelados pela ação do vento.  
↓ Fig.42 Emergência de cristais de água.

Biotecnologia. Deste modo, através da investigação e manufacturação provenientes desta exploração biotecnológica, novos elementos são introduzidos em várias ciências, ampliando os respectivos conhecimentos tecnológicos.

### 1.2.3.a. Emergência e Morfogénese

As tecnologias actuais têm possibilitado uma melhor compreensão da Natureza viva, permitindo reunir um novo conhecimento dos processos e organismos presentes na Biologia. Nas biotecnologias, os objectos naturais são considerados como modelos, e as respectivas particularidades benéficas aplicadas às suas diversas áreas, surgindo como novo fenómeno tecnológico e como nova doutrina biotecnológica.

Para uma melhor compreensão deste fenómeno, é necessário possuir um conhecimento profundo do mundo biológico, especialmente a compreensão dos conceitos de emergência e morfogénese.

A emergência<sup>33</sup> consiste numa explicação da evolução e da capacidade de manutenção dos sistemas naturais, que, segundo um conjunto de modelos e processos, são capazes de criar sistemas artificiais desenhados para produzir formas e comportamentos complexos.<sup>34</sup> O significado do termo refere à “[...] «emergência» de formas e comportamento dos complexos sistemas do mundo natural. Um corpo substancial de conhecimento cai sob este termo, ocorrendo na sobreposição dos domínios de desenvolvimento da Biologia, da Físico-Química e Matemática.”<sup>35</sup>

Segundo John Holland<sup>36</sup>, somos confrontados por inúmeros exemplos de emergência quando observamos os variados e complexos sistemas adaptativos. Estes encontram-se presentes em inúmeros casos, como, por exemplo, nas colónias de

---

<sup>33</sup> *Emergência* é um conceito comum às Ciência, Filosofia, Arte e Teoria de Sistemas. O significado de emergência tem sido redefinido numa perspectiva temporal, desde a antiga Grécia de Aristóteles até à actualidade. No entanto, a “oficialização” do termo surge pela autoria do filósofo inglês G.H. Lewis, em 1875. Lewis, em conformidade com os princípios reguladores da Química, distingue a resultante de emergente como um processo dinâmico: “[...] *although each effect is the resultant of its components, we cannot always trace the steps of the process, so as to see in the product the mode of operation of each factor. In the latter case, I propose to call the effect an emergent. It arises out of the combined agencies, but in a form which does not display the agents in action [...]*”. In. ALLEN, Peter; MAGUIRE, Steve; MCKELVEY, Bill - *The Sage Handbook of Complexity and Management*. p.66.

<sup>34</sup> “AD : Architectural Design”. London : Wiley Academy. 2004, 74:3. p.6.

<sup>35</sup> *idem*.

<sup>36</sup> John Henry Holland (1929 - ) é um cientista americano, professor de Psicologia, de Engenharia Eléctrica e de Ciência Computacional na Universidade de Michigan. Pioneiro no estudo de sistemas complexos e na ciência não-linear, Holland estabeleceu uma inédita e inovadora relação entre Biologia e Computação. Desta relação surgem os algoritmos genéticos - a sua criação mais importante.



formigas, na rede de neurónios, no sistema imunitário, na internet ou na economia global. Desta forma, quando falamos de emergência, o comportamento do todo revela-se mais importante do que o comportamento de qualquer das suas partes.<sup>37</sup>

Holland foi uma das figuras centrais no estudo do conceito de emergência, tendo explorado este conceito no estudo *Emergence from Chaos to Order* que dividiu em três tipologias distintas: conceitos matemáticos, conceitos e sistemas de jogos e conceitos informais. Seguindo estas três tipologias, procurou encontrar, definir e discutir o conceito de modelação proveniente da emergência.

A compreensão do conceito emergência e a sua aplicação revela-se como um valioso conhecimento presente em diferentes áreas, como na biologia, na matemática, na inteligência artificial, nas teorias da informação, na informática, nos novos campos de estudo climáticos e meteorológicos, nas ciências materiais, e sobretudo na engenharia biomimética.<sup>38</sup>

No caso da Arquitectura, a utilização e compreensão deste conceito permite uma maior ampliação do conhecimento arquitectónico, bem como das aplicações de soluções biológicas. Assim, uma nova variedade de estratégias, modelos e processos emergentes biológicos poderão ser aplicados utilitariamente a edifícios, espaços urbanos, sistemas construtivos ou à própria gestão do projecto. A capacidade de análise e a programação das ferramentas digitais de desenho também podem evoluir com este conceito, pelo que permite obter uma nova e diferente especificidade arquitectónica.

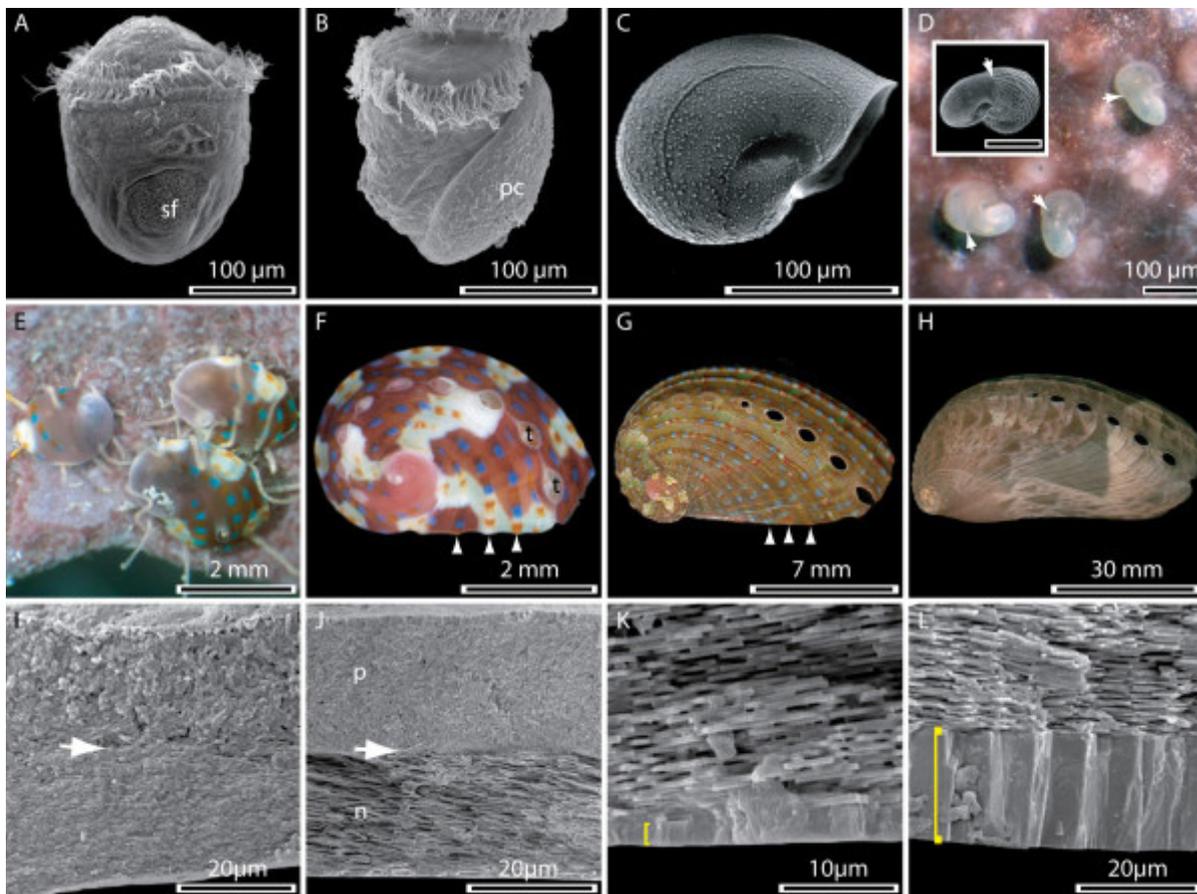
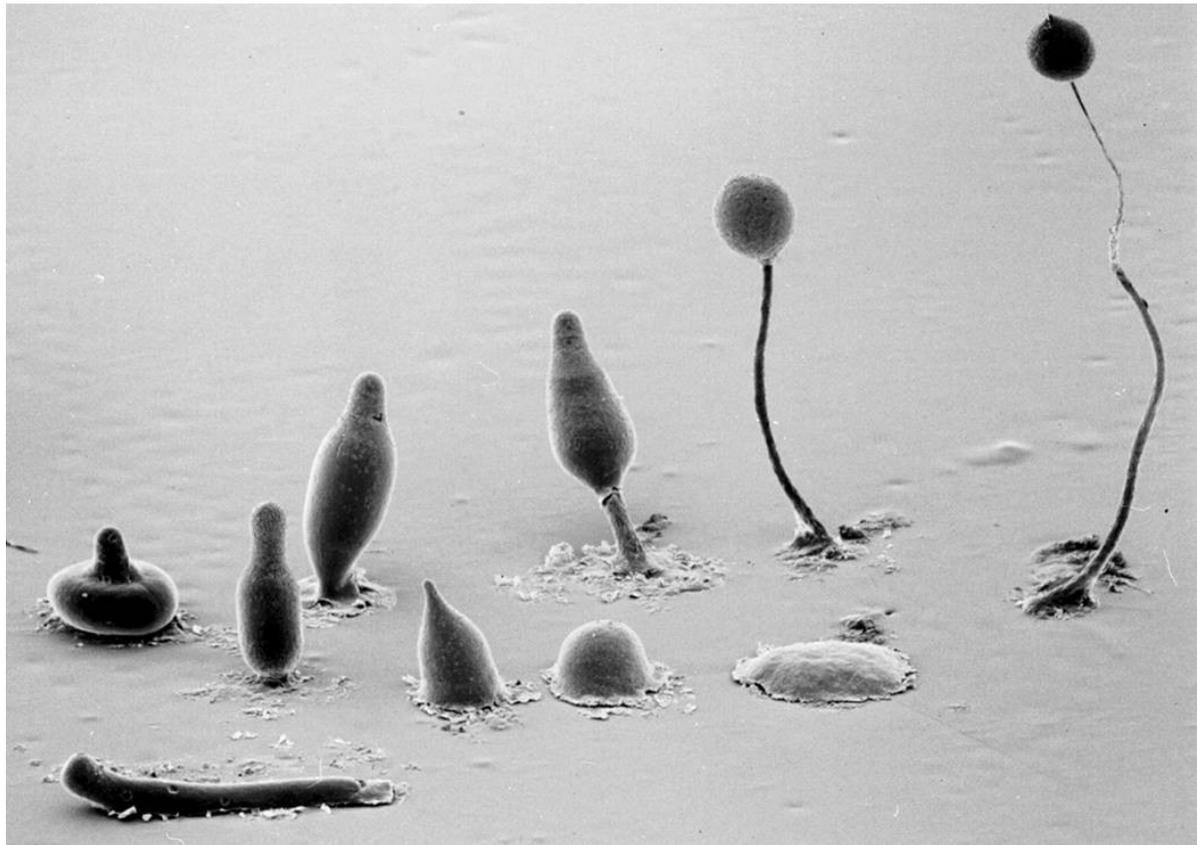
Como já foi referido, os processos e técnicas emergentes possuem uma componente matemática muito demarcada, pelo que a aplicação deste conceito tem invadido outros domínios, em que a análise e a produção de complexas formas, ou de comportamentos surgem como elementos centrais das respectivas áreas. Com a produção complexa de comportamentos emergentes (fundamentados nos processos e sistemas biológicos) nasce a possibilidade de novos processos de desenho generativo, de formas e estruturas segundo os processos de morfogénese.

A morfogénese, tal como a emergência, é um conceito amplo e vasto proveniente do universo biológico. Por morfogénese entendemos, numa visão abstracta, como um

---

<sup>37</sup> "AD : Architectural Design". London : Wiley Academy. 2004, 74:3. p.8.

<sup>38</sup> COSTA, Mauro - *Analogias Biológicas en la Arquitectura – Del acercamiento biónico hacia los paradigmas de lo biodigital*. p.425.



↑ Fig.43 Morfogenese da Ameba. A Ameba é um protozoário pertencente ao filo *Sarcomastigophora*.

↓ Fig.44 Morfogenese do gastrópode *Haliotis*, único da família *Haliotidae*, conhecido como orelha do mar.

sistema de leis e de processos responsáveis pela formação das formas vivas perante as variantes de um determinado ambiente. Como o próprio termo indica, a gênese da morfologia, implica uma desmistificação dos princípios e processos generativos biológicos, pois só através desta compreensão é possível assimilar o *porquê* ou essência das formas naturais.<sup>39</sup>

Alan Matison Turing<sup>40</sup>, criador do *Turing test*<sup>41</sup>, escreveu em 1952 o célebre artigo *The Chemical Basis of Morphogenesis*. O artigo descreve o modo como, através das reacções bioquímicas catalisadas pelas enzimas, juntamente com a difusão, pode causar a instabilidade dos espaços uniformes, reflectindo-se em transformação espontânea de padrões espaciais (descritos como ondas estacionárias de concentração química). Desta forma, foi possível concluir que a junção entre as leis físicas e químicas operadas segundo um contexto biológico pode gerar padrões - que ao contrário desta modelação natural, não são influenciados pela componente genética dos organismos.<sup>42</sup> Segundo a análise de Turing, o campo teórico morfogenético é dividido em três componentes:

- A primeira consiste no processo espontâneo de quebra de simetria ou de bifurcação numa forma natural simétrica, que origina uma nova e estável forma assimétrica, devido às forças existentes no seu sistema de formação. Esta forma, inicialmente simétrica e instável face às variantes do sistema em causa, sofre um processo de mutação, estabilizando-a de acordo com o seu sistema.

- A segunda consiste nos elementos exteriores, em que a sequência morfogenética é construída (caminhos morfogenéticos). Segundo este principio, é

---

<sup>39</sup> Morfogénese é oriundo do grego *morphê* – forma e *gênesis* – criação. As primeiras ideias presentes neste conceito biológico surgem através dos estudos realizados por D’Arcy Thompson e Alan Turing. “*Morfogénese é fazer formas, as leis (i.e., princípios generativos) em que são baseadas são aquelas que descrevem como as formas são iniciadas em sistemas com particulares tipos de organização espaço-tempo. Tecnicamente, são processos de quebras de simetrias, que resulta na emergência de um resultado mais complexo de uma estrutura mais simples (mais simétrica)*”. In. “AD : Architectural Design”. London : Wiley Academy. 2004, 74:3. p.7. [trad. do a.].

<sup>40</sup> Alan Mathison Turing (1912 – 1954) foi um matemático inglês, criptoanalista, lógico, cientista da computação britânica e uma das figuras centrais da ciência de computação. Entre os vários contributos tecnológicos, Turing foi o responsável pela formulação do conceito de algoritmo e impulsionou o conceito do computador moderno. Durante a Segunda Guerra Mundial trabalhou como criptoanalista ao serviço da Inteligência Britânica, sendo o chefe da Hut8 (secção responsável pela criptoanálise da frota naval alemã). Deste programa, Turing cria o *Colossus* - um computador de descodificação capaz de decifrar vinte cinco mil caracteres por segundo. Este computador foi o primeiro computador electrónico, digital e programável do mundo.

<sup>41</sup> O *Turing Test* foi criado por Allan Turing com a principal finalidade de examinar se um computador é capaz de expressar, ou não, padrões de inteligência semelhantes aos do ser humano. Este teste é desenvolvido em consequência do artigo escrito pelo próprio *Computing Machinery and Intelligence*, publicado na revista *Mind* em 1950. Segundo este artigo, são expostas as primeiras ideias de inteligência artificial na Máquina.

<sup>42</sup> LYNN, Greg - *Greg Lynn Form*. p.180.



analisado o que se denomina como *funções harmónicas*, que revelam, através das leis físicas e das reacções químicas, as sequências morfogenéticas que são construídas em função das variantes, dos processos e do ambiente, de acordo com o determinado espaço-tempo.

- A terceira e última componente revela como o factor energético é um elemento-chave nos sucessivos passos do processo de formação de padrões. Normalmente, os padrões biológicos tendem a ser formados segundo uma gestão eficiente, em que a energia tende a seguir os caminhos mínimos energéticos. Este factor, embora aplicado de formas variadas aos sistemas biológicos, é maioritariamente gerido conforme a maior eficiência possível. D'Arcy Thompson<sup>42</sup> foi um dos biólogos que estudou esta componente na natureza viva, obtendo uma caracterização detalhada de formas biológicas como superfícies de energia mínima.<sup>43</sup>

Esta compreensão morfológica da Natureza permitiu um novo entendimento das formas naturais e da sua relação determinante entre o ambiente, os processos, os sistemas e o gasto energético, revelando-se como factores decisivos para formação morfológica da Natureza. Assim, a morfogénese, juntamente com a emergência, são dois “conhecimentos obrigatórios” quando falamos de áreas generativas apoiadas no universo biológico, e das tecnologias destas derivadas.

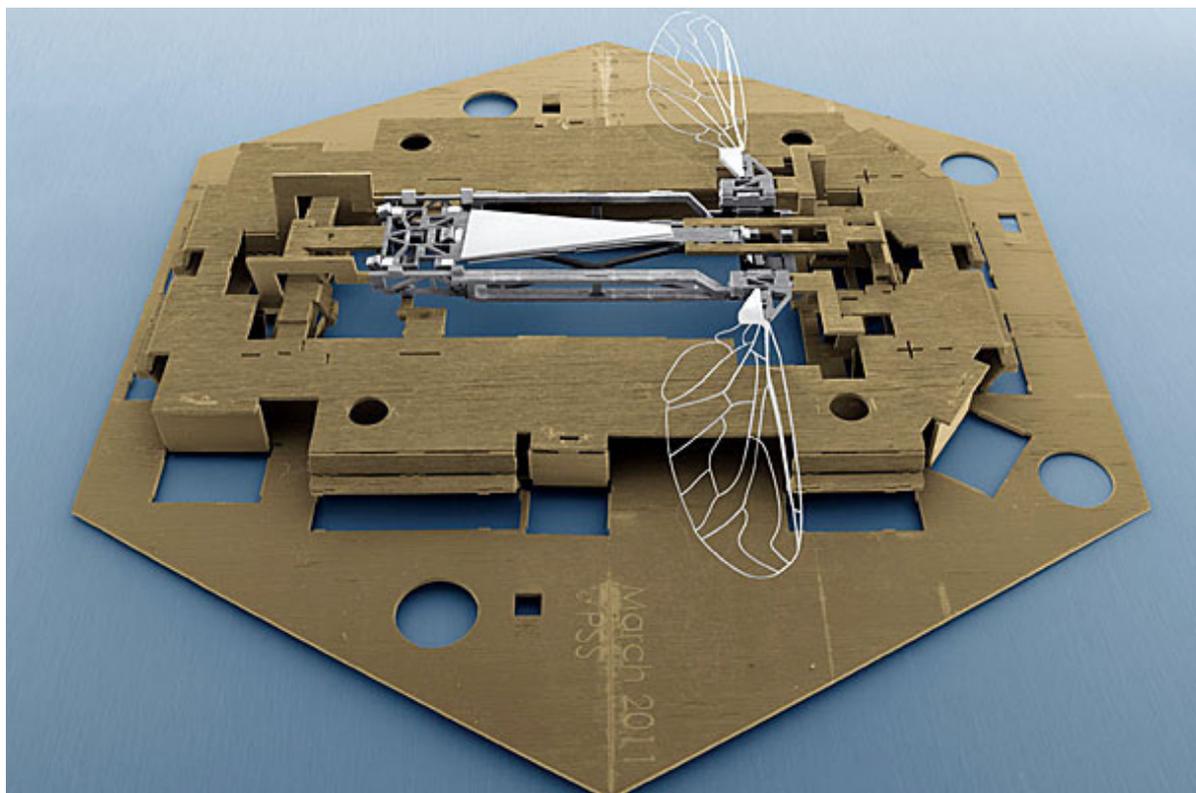
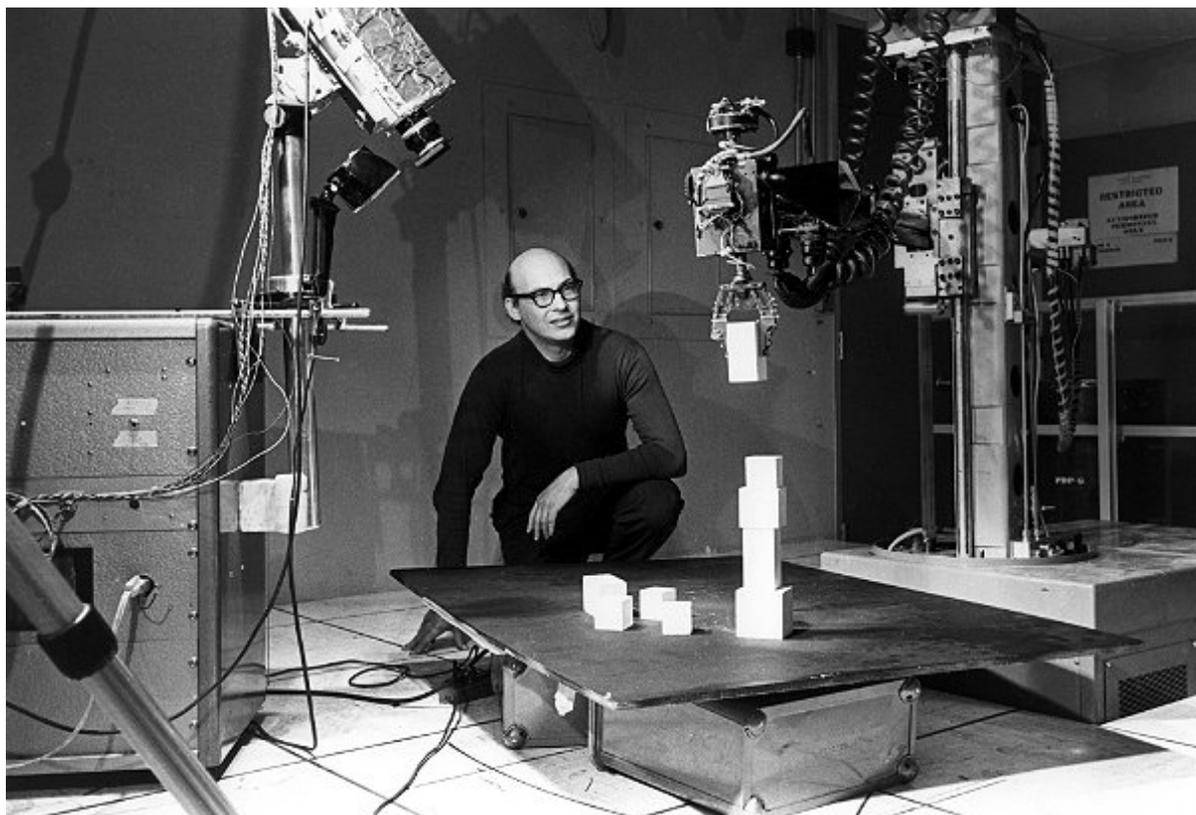
### 1.2.3.b. I.A. e V.A.

A nova vaga biotecnológica originou uma nova compreensão da Biologia e, com ela, surge um novo conceito de informação. Esta nova tipologia informativa reúne a Biologia e as novas tecnologias, em específico a computação, a qual surge como o elemento capaz de analisar, processar e registar os dados provenientes desta investigação.

---

<sup>42</sup> D'Arcy Wentworth Thompson (1860 – 1948), biólogo escocês e pioneiro da biologia matemática, foi professor de Biologia na Universidade de Dundee, na Escócia. Em 1917 publicou a sua obra mestre *On Grow and Form*: um valioso contributo para a análise da morfologia na Biologia. Esta obra teve a particular característica de (através de uma perspectiva matemática e física) analisar os processos biológicos sem precedentes. Através dos seus diagramas de forças, D'Arcy Thompson explicou o desenvolvimento, o crescimento e as variáveis responsáveis pelas soluções morfológicas naturais. Também justificou e distinguiu a ideia de que as estruturas microscópicas e de pequena dimensão são condicionadas pela acção directa das forças físicas a nível molecular, ao contrário das estruturas grandes, que são relacionadas por factores mecânicos. Outro ponto de grande interesse da sua obra reside na comparação das formas relacionadas com a sua análise matemática e diagramática capaz de estabelecer as relações existentes entre diferentes organismos.

<sup>43</sup> LYNN, Greg -*Greg Lynn Form*. p.180.



↑ Fig.45 *Minsky Arm* de Marvin Minsky. Este braço mecânico é capaz de interagir com objectos de forma autónoma constituindo um exemplo elucidativo de I.A.

↓ Fig.46 Robô Abelha criado pela Escola de Harvard de Engenharia e Ciências. Através deste projecto pretende-se simular o voo das abelhas.

O uso computacional tornou-se uma ferramenta indispensável, capaz de estabelecer a ligação entre o investigador e o investigado, mas acima de tudo capaz de traduzir e de registar a complexidade presente no universo genético da Biologia. Hoje o computador é utilizado tanto na investigação biológica, na investigação genética, como na Arquitectura, consagrando-se a ferramenta fulcral para decifrar, seriar, armazenar e organizar a nova informação biológica proveniente do estudo destas áreas.

O desenvolvimento contínuo da computação nas últimas décadas, merece uma especial atenção (na óptica desta dissertação), nomeadamente nas áreas das ciências informáticas e da cibernética. Estes dois universos utilizam, de forma compulsiva soluções, mecanismos e conhecimentos provenientes da Biologia que, por sua vez, traduzem-se em ferramentas biotecnológicas de grande valor, não só para as suas áreas, como também para a Arquitectura.

No entanto, o uso do computador na Arquitectura é um processo relativamente recente, pois os vários fracassos e qualidade dos computadores do passado, tal como a fiabilidade das ferramentas digitais capazes de “projectar” arquitectura eram, até meados de 1990, incapazes de reproduzir ou gerar resultados suficientemente convincentes.<sup>44</sup> Ainda assim, e inserido no universo biotecnológico, a evolução computacional e suas ferramentas antecede à década de 90.

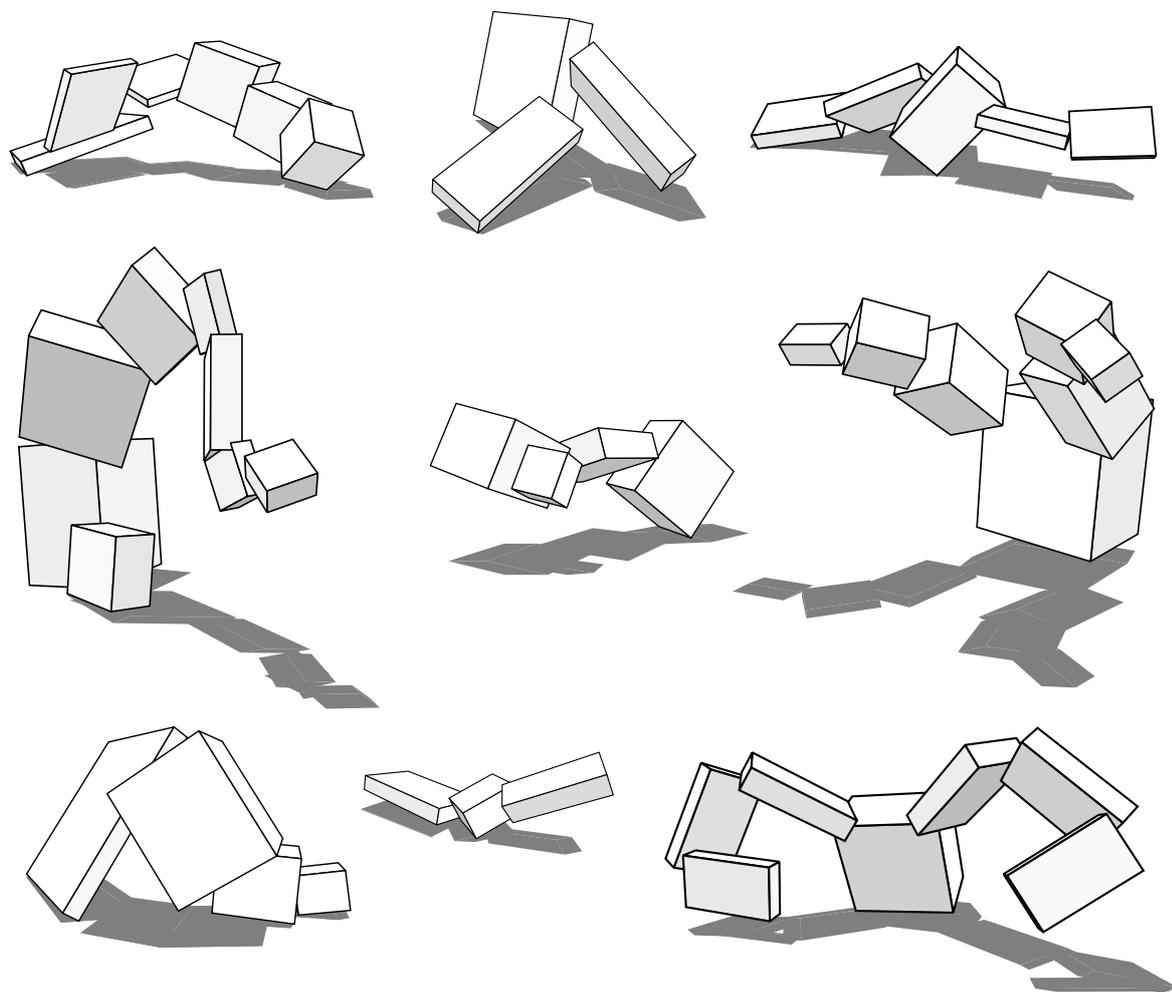
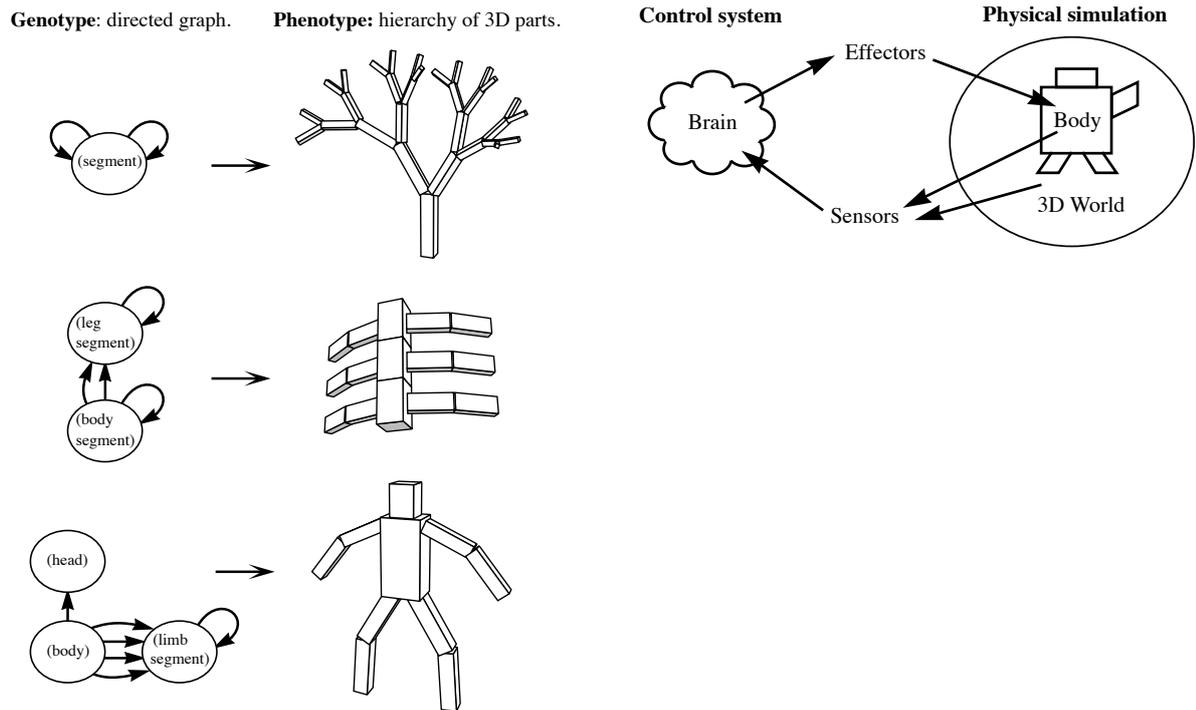
O computador, bem como as suas aplicações, é programado para “pensar” segundo uma determinada linguagem e logística, capacitando a realização das funções que lhes são atribuídas. Esta logística, que tem vindo a ser apurada e desenvolvida, parte da programação e da inteligência virtual, que lhes é atribuída.

A Inteligência Artificial (I.A.) encontra-se presente nas várias tecnologias computacionais e tem sido desenvolvida à imagem dos processos biológicos presentes na Natureza, assim como à imagem da inteligência humana.

A complexidade e dificuldade desta matéria reflectiu-se numa longa investigação até à actualidade, em que o horizonte da I.A. tem procurado atingir a maior semelhança possível à mente humana. Em consequência, na década de 50, este paradigma artificial foi destacado da informática geral, através do conhecido instituto norte-americano MIT.

---

<sup>44</sup> COSTA, Mauro - *Analogias Biológicas en la Arquitectura – Del acercamiento biónico hacia los paradigmas de lo biodigital*. p.382.



⌞ Fig.47 Investigação de V. A. realizada por Karl Sims com o objectivo de gerar criaturas e comportamentos artificiais num mundo virtual 3D. Vários exemplos de diferentes genótipos e suas correspondências na morfologia das criaturas.

↗ Fig.48 Ciclo de efeitos entre o cérebro, o corpo e o mundo.

↓ Fig.49 Resultados do exercício relativo às criaturas programadas para se moverem da melhor forma possível.

É através do investigador John McCarthy<sup>45</sup> que a I.A. surge como campo de investigação autónomo, no ano de 1956. Neste mesmo ano, e em colaboração com Marvin Minsky (1927-) e Claude E. Shannon (1916 – 2001), foram estabelecidas as condições necessárias para o futuro desenvolvimento desta doutrina científica.<sup>46</sup>

A Inteligência Artificial, por estudar um conceito tão ténue e profundo – a inteligência - é difícil de definir nas suas fronteiras e objectivos, dadas a complexidade e a dificuldade apresentadas por este processo tão singular. Daí que a I.A. tenha procurado sistemas ou mecanismos computacionais capazes de criar, copiar ou reproduzir certos “comportamentos biológicos”, que possibilitem um processo autónomo de pensamento computacional.

Esta autonomia computacional originou um novo carácter generativo e evolutivo no computador, bem como nos seus programas, onde novas soluções são formuladas de acordo com as teorias evolutivas presentes nos sistemas biológicos. Segundo as teorias evolutivas da Natureza devemos destacar a importância da vida artificial. Através da vida artificial, tem sido possível identificar as diversas propriedades fundamentais comuns aos diferentes sistemas vivos, e simultaneamente compreender e simular o longo processo de criação do nosso Planeta e da sua Natureza.

Podemos considerar o biólogo Christopher Langton<sup>47</sup> como o principal fundador da *vida artificial*. Esta denominação surge em 1987, durante a primeira *Conferência internacional sobre a síntese e simulação de sistemas de vida*, realizada no Laboratório Nacional de Los Álamos.<sup>48</sup> Langton define a vida artificial como o estudo realizado por sistemas fabricados pelo Homem, os quais exibem características comportamentais semelhantes aos sistemas vivos naturais. Através deste estudo, é possível completar as investigações biológicas tradicionais dos organismos vivos com

---

<sup>45</sup> John McCarthy (1927 - 2011) cientista americano da computação e inventor do termo *inteligência artificial* (IA), foi uma figura central e elementar no ramo da IA. Para além de impulsionador inicial deste ramo de investigação, McCarthy desenvolveu a linguagem de programação *LISP*, influenciou o desenho da linguagem de programação *ALGOL* e popularizou o *timesharing* computacional.

<sup>46</sup> COSTA, Mauro - *Analogias Biológicas en la Arquitectura – Del acercamiento biónico hacia los paradigmas de lo biodigital*. p.395.

<sup>47</sup> Christopher Langton (1949 - ) - principal fundador da *vida artificial* e responsável por reformular grande parte da logística e filosofia através da simulação e dos modelos computacionais. Através da Física e Biologia, Langton deu origem a uma nova sinergia computacional, determinante para o futuro desenvolvimento deste ramo tecnológico.

<sup>48</sup> COSTA, Mauro - *Analogias Biológicas en la Arquitectura – Del acercamiento biónico hacia los paradigmas de lo biodigital*. p.448.



uma nova metodologia artificial, a qual, com a simulação de novos comportamentos computacionais, permite um entendimento mais profundo da natureza viva.

Embora próximos nos seus objectivos, os estudos realizados pela Biologia são, de certa forma, distintos dos estudos realizados pela vida artificial. Ou seja, a grande preocupação da Biologia centra-se no estudo da base material da vida, enquanto que a vida artificial tem como principal elemento o estudo da base formal da vida. Para este efeito, a vida artificial procura desenvolver sistemas biológicos capazes de traduzir e compreender os sistemas biológicos provenientes da Natureza.

Vários modelos biológicos são estudados e aplicados à vida artificial, tendo como principal objectivo a maior proximidade reprodutiva dos sistemas e comportamentos presentes na Biologia. Assim, por exemplo, o comportamento e funcionamento social das formigas, das abelhas ou dos variados microrganismos são estudados como exemplos e aplicados com a maior veracidade possível, quer ao mundo virtual, quer a outros resultados analógicos, em que a vida artificial faz parte integrante (como a robótica).

Esta compreensão e a geração destes sistemas cruzam em muitos aspectos os princípios estudados pela I.A., pelo que podemos afirmar que ambas as áreas de investigação encontram-se intimamente relacionadas. Embora com objectivos diferentes, uma área abrange a outra, porquanto ambas procuram, através da simulação artificial, criar sistemas capazes de compreender e de reproduzir os processos presentes na Biologia, coabitando no mesmo mundo artificial – o computador.

### **1.2.3.c. Tecnologias Generativas**

O estudo contínuo do universo biológico tem permitido criar novas ferramentas tecnológicas na área da Biotecnologia. Estes resultados, apoiados nos conceitos de emergência, de morfogénese, de auto-organização, tal como nos processos e sistemas naturais responsáveis pela geração de vida e de soluções biológicas, têm reflectido um novo conceito de emergência tecnológica com capacidades generativas inovadoras. Desta forma, a tecnologia ganha uma nova metodologia generativa, a qual tem conquistado várias áreas científicas, desde a Matemática até às ciências informáticas e à Arquitectura.



↑ Fig.50 Exemplo do fenômeno emergente de auto-organização de um cardume.

↓ Fig.51 Fenômeno emergente de auto-organização de um bando de pássaros. Este fenômeno é semelhante ao que ocorre com os automatas celulares. Cada ser responde segundo regras básicas que impõem um padrão complexo ao conjunto segundo uma hierarquia de baixo para cima.

Surge uma nova capacidade autónoma tecnológica capaz de oferecer múltiplos resultados, segundo a geração de hipóteses formuladas de acordo com as leis naturais. Podemos denominar este exercício por *processos generativos*, cujo conceito tem sido adoptado tanto no universo computacional como na arquitectura.

A *arquitectura generativa*<sup>49</sup>, tal como a *vida artificial*, são duas áreas de investigação possuidoras de vários pontos comuns às metodologias utilizadas.

Segundo Jeffrey Krause, a arquitectura generativa pode ser definida como “[...] a aproximação do desenvolvimento de aplicações ou sistemas, que podem desenvolver, evoluir ou desenhar estruturas arquitectónicas, objectos ou espaços, mais ou menos autónomos, dependendo da circunstância.”<sup>50</sup>

Associado à arquitectura generativa, encontra-se a denominação de *arquitecturas genéticas*, a qual é construída de acordo com os conceitos de evolução biológica, de evolução tecnológica, do código genético e da codificação digital, recorrendo ao uso de analogias. Através destes conhecimentos, é possível atribuir ordem, coerência e coesão ao processo de geração de resultados, obtendo uma melhor viabilidade generativa na Arquitectura. Assim, quando falamos de arquitectura generativa, é necessário compreender o conceito proveniente do universo biológico - a auto-organização.

Este processo biológico consiste essencialmente na capacidade organizadora que os seres vivos e respectivos processos possuem, face às adversidades presentes nos ambientes em que se encontram inseridos.

Curiosamente, o filósofo Immanuel Kant (1724 – 1804) foi um dos primeiros a utilizar o termo *auto-organização*, cujo princípio referia-se ao comportamento organizacional presente entre as partes de um organismo.<sup>51</sup>

Segundo Michael Hensel, a “*Auto-organização pode ser descrita como um processo dinâmico e adaptativo, através do qual sistemas atingem e mantêm a estrutura sem controle externo.*”<sup>52</sup>

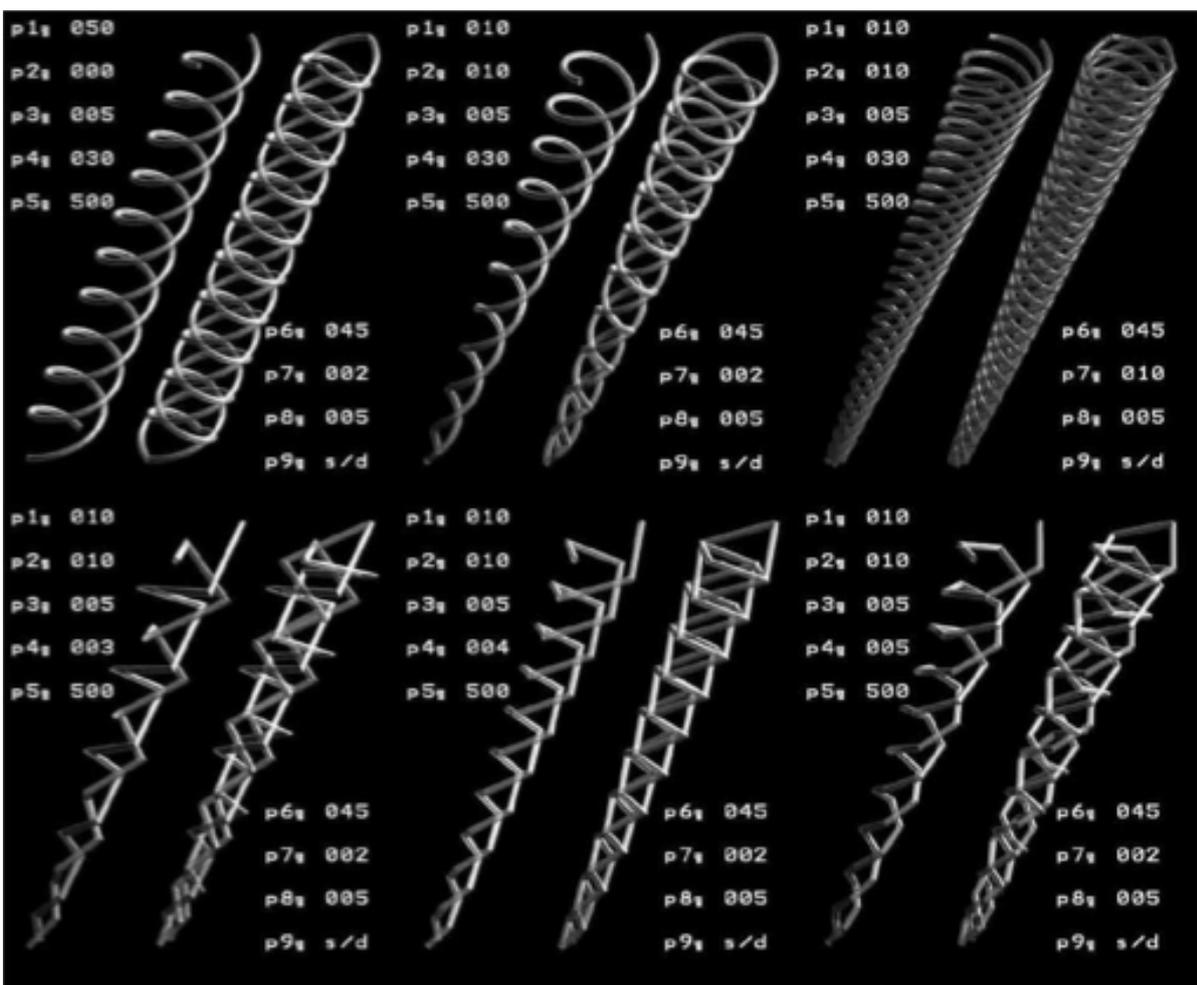
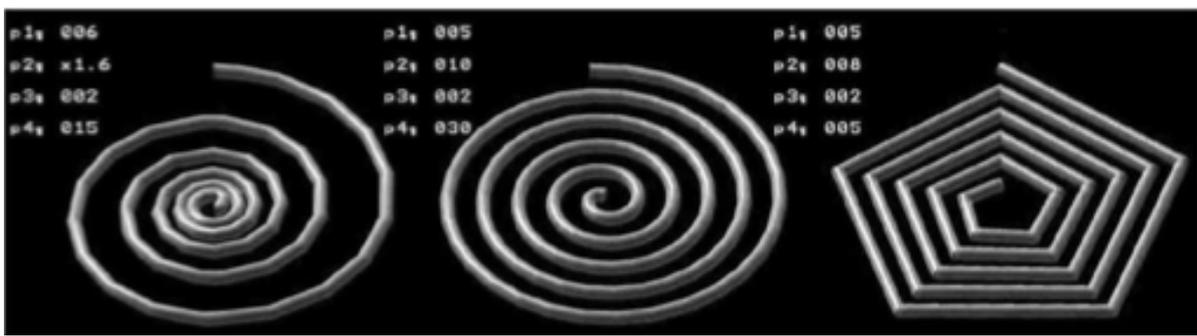
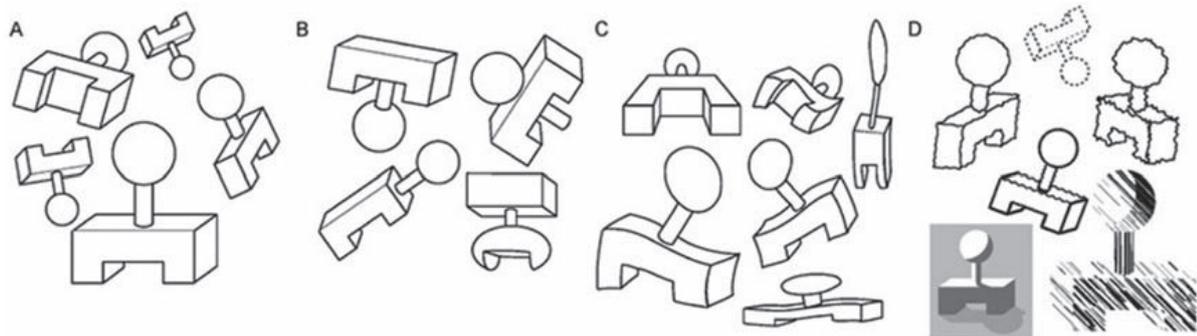
---

<sup>49</sup> A arquitectura generativa é criada através do desenho generativo. Entende-se por desenho generativo uma metodologia de desenho, em que o output (seja uma imagem, um som, um modelo arquitectónico ou animação) é gerado por um conjunto de regras ou algoritmo. O desenho generativo depende do computador e dos programas generativos derivados da computação, os quais permitem uma modelação paramétrica de infinitas variáveis e de grande utilidade para as diferentes formas de design.

<sup>50</sup> KRAUSE, Jeffrey - *Reflections: The Creative Process of Generative Design in Architecture*. p.1. [trad. do a.].

<sup>51</sup> COSTA, Mauro - *Analogias Biológicas en la Arquitectura – Del acercamiento biónico hacia los paradigmas de lo biodigital*. p.232.

<sup>52</sup> “AD : Architectural Design”. London : Wiley Academy. 2006. 76:2. p.6. [trad. do a.].



↑ Fig.52 Exemplos de modelação algorítmica.  
 → Fig.53 Formas iniciais do exercício de modelação algorítmica realizado com o código LISP (de John McCarthy) por Mauro Costa.  
 ↓ Fig.54 Resultados da manipulação das formas iniciais com diferentes variáveis.

Ou seja, este fenómeno de auto-organização revela a capacidade geradora de padrões comportamentais de um sistema, face às interações das suas partes, como às interações realizadas entre o sistema e a sua envolvente.

Podemos encontrar vários exemplos de auto-organização na Natureza a diferentes escalas, tais como o crescimento de uma planta, as sociedades de insectos, a configuração celular de um organismo, ou inclusive a capacidade organizacional do Universo e da sua matéria. Desta forma, e segundo a compreensão contínua deste conceito até à actualidade, a auto-organização passou a estar presente em várias doutrinas, como na Biologia, na Termodinâmica, na Cibernética, na vida artificial, nas Artes e, por consequência, também na Arquitectura, como é o caso da arquitectura generativa.

Seguindo este conceito de auto-organização e os princípios generativos acima referidos, é necessário destacar a importância dos algoritmos na capacidade artificial de gerar resultados.

Segundo Mauro Costa, *“os algoritmos são uma das primeiras formas de registo matemático de situações não estáticas, podendo representar, através de uma função matemática, uma acção ou um processo.”*<sup>53</sup>

A origem do algoritmo provém dos estudos realizados pelo matemático persa Abu Abdullah Muhammad Bin Musa al-Khwarizmi<sup>54</sup> durante os séculos VIII e IX. Estes estudos foram traduzidos para o latim, no séc. XII do qual nasce a palavra *algarismo*. Esta, sofreu um processo de mutação ao longo dos séculos e, finalmente no séc. XVIII, surge pela primeira vez o termo *algoritmo*.<sup>55</sup> É de salientar que o conceito de algoritmo e as tecnologias dele derivadas, têm evoluído ao longo do seu percurso. Neste processo evolutivo, e de acordo com o estudo aqui apresentado, há que destacar os *algoritmos genéticos*.

---

<sup>53</sup> COSTA, Mauro - *Analogias Biológicas en la Arquitectura – Del acercamiento biónico hacia los paradigmas de lo biodigital*. p.407. [trad. do a.].

<sup>54</sup> Abdullah al-Khwarizmi (a. d.C. 780 - a. d.C. 850) é considerado o fundador da Álgebra. Resultado da imprecisão cronológica e da pouca informação histórica, poucos detalhes se conhecem da sua vida. No entanto, Abdullah revelou-se um verdadeiro erudito da Escola da Sabedoria de Bagdad. Para além do seu interesse pela Matemática, também demonstrou um particular interesse pela Astronomia, pela Astrologia e pela Geografia. Escreveu o *“Kitab al-Jabr wa-l-Muqabala”*, (em português *Compendio de cálculo por conclusão e comparação*), no qual surge a primeira solução sistemática das equações lineares e quadráticas.

<sup>55</sup> COSTA, Mauro - *Analogias Biológicas en la Arquitectura – Del acercamiento biónico hacia los paradigmas de lo biodigital*. p.407.



Os *algoritmos genéticos* podem ser entendidos como um processo de geração de vida artificial, capaz de simular a genética biológica na computação digital. O seu desenvolvimento surge na década de 1970, pela autoria de John Holland, com a finalidade de compreender e traduzir os processos adaptativos presentes nos seres vivos. Assim, esta tipologia de algoritmos procura encontrar ou otimizar soluções aproximadas e capazes de resolver a complexidade presente num problema particular. As suas técnicas evolutivas são apoiadas na biologia evolutiva, usufruindo dos conceitos de herança, mutação e selecção natural presentes no universo natural.

Como tal, um algoritmo genético possui um *genótipo*<sup>56</sup>, ou seja, um código em cadeia, que por sua vez especifica um *fenótipo*<sup>57</sup>, o qual pode ser constituído por um artefacto digital, tal como um organismo artificial ou uma forma tridimensional derivada de um software. Estes “objectos” reproduzem-se segundo múltiplos resultados e, mediante a alteração do genótipo e do fenótipo, oferecem uma multiplicidade de resultados distintos face ao “problema” em análise.

Não obstante, a resolução de problemas com algoritmos genéticos não se centra na procura de uma solução ideal, mas sim na criação de um processo gradual de proximidade por geração e prova. Esta particularidade permite a sua aplicação a problemas irresolúveis, desde que os algoritmos genéticos sejam programados a avaliar as variantes presentes no problema em causa. Desta forma, o ambiente da solução-alvo deve ser devidamente caracterizado, identificando o maior número de características implícitas no problema em causa.

Este processo computacional também pode ser utilizado em prol da Arquitectura, substituindo o genótipo e fenótipo, por variantes e elementos arquitectónicos, respectivamente. Estes serão analisados e processados segundo uma linguagem arquitectónica programada e traduzidos posteriormente em resultados arquitectónicos. Ou seja, os algoritmos genéticos, através de um processo generativo, surgem como uma ferramenta digital capaz de oferecer “hipóteses” distintas às condicionantes

---

<sup>56</sup> Genótipo – as informações hereditárias de um organismo contidas no seu genoma. A informação genética (genoma) é herdada dos seus progenitores e, segundo distintas configurações genéticas, origina diferentes resultados biológicos entre os vários organismos.

<sup>57</sup> Fenótipo – as características observáveis de um organismo, tais como a morfologia, o desenvolvimento, as propriedades bioquímicas e fisiológicas ou o comportamento. Ou seja, o fenótipo é o resultado da expressão dos genes do organismo, da influência dos factores ambientais e da possível interação entre os dois.



arquitectónicas em causa. Este exercício é descrito no universo da Arquitectura como *arquitectura generativa*.

A modelação algorítmica, tal como a paramétrica, são duas metodologias de que usufrui a arquitectura generativa. São ambas capazes de criar uma nova componente gerativa de soluções e de processos morfológicos, revelando-se de grande utilidade à arquitectura generativa.

A segunda componente (a modelação paramétrica) consiste num processo de modelação simulado através do computador, em que o seu funcionamento é realizado através da inserção de parâmetros, que podem ser modelados e alterados durante o processo generativo. A utilização deste processo permite ao utilizador uma maior experimentação na morfologia de um objecto. Ou seja, embora os elementos de um dado objecto se encontram pré-definidos, todavia as variantes que controlam esses mesmos elementos podem ser exploradas e alteradas.

Tomemos o sólido cubo como exemplo: as seis faces, inicialmente iguais entre elas, podem ser modeladas e alteradas tanto na forma como nas suas dimensões, através da alteração dos seu parâmetros. O objecto modelado inicialmente é um cubo, no entanto o resultado final poderá estar muito distante.

Este exercício permite ao arquitecto uma libertação do objecto arquitectónico e focar-se essencialmente no desenvolvimento morfológico de uma ideia através da sua modulação e experimentação, possibilitando o que outras ferramentas de desenho (por exemplo o CAD) não conseguem reproduzir. Embora a forma seja uma componente explorada por este exercício, a modelação paramétrica permite uma nova exploração do espaço geométrico, oferecendo uma nova doutrina na arte de projectar e organizar o espaço arquitectónico.

#### 1.2.3.d. **Biomateriais**

Inserido no ramo tecnológico e biológico, encontramos uma doutrina que tem ganho destaque gradual nos últimos anos. Esta recente doutrina abrange as biotecnologias e a ciência dos materiais, onde têm surgido novos exemplos de biomateriais. Também reconhecidos por *bioterais*, têm revolucionado a era industrial em diferentes áreas científicas. Efectivamente, desde o mercado da construção até às



ciências vivas, têm sido criados diferentes materiais, a diferentes escalas, apoiados segundo as propriedades benéficas e solutivas dos materiais biológicos. Desta forma surge um novo domínio da matéria orgânica e inorgânica, em que a génese destas duas componentes tem oferecido valiosas inovações materiais.

Actualmente a matéria é um conceito mutável entre o vivo e o artificial, nos quais as fronteiras se cruzam e oferecem uma nova materialidade simbiótica. A união da Biologia, da Física, da Química, e das Nanociências têm oferecido um profundo entendimento dos constituintes dos materiais, do seu uso e da manipulação dos seus elementos. Surge, assim, uma nova compreensão da matéria, onde o átomo é o elemento capaz de construir novas matérias.

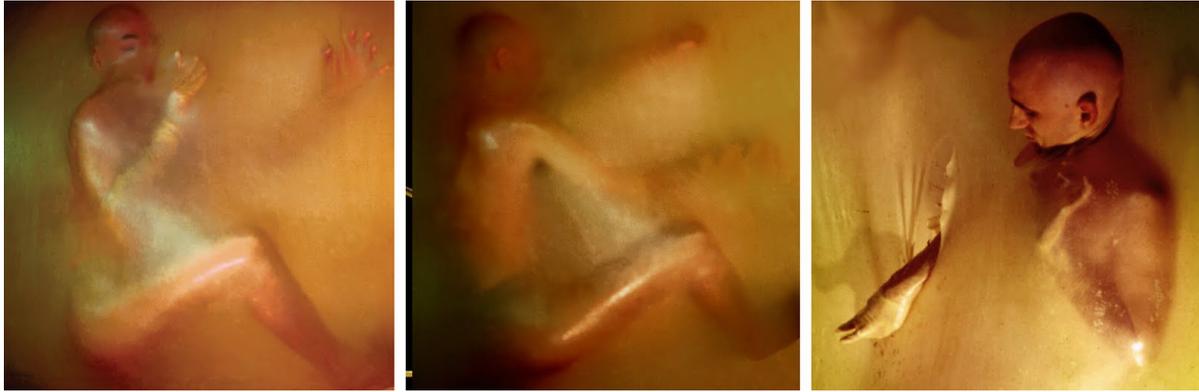
O domínio da nanoescala revelou um novo mundo material e, por consequência, uma nova construção da matéria. Hoje é possível perceber as nanoconstruções de átomos e células, tal como as propriedades, os materiais e configurações morfológicas da Natureza. Este domínio permite um novo processo análogo de conversão e materialização, dos objectos naturais estudados ao nosso universo humano.

Encontramo-nos claramente na Era Molecular, onde a manipulação da matéria e do construído ganhou um carácter *biotech* nas várias ciências, na indústria e no mercado económico.

Foi através de Richard Oliver que é introduzido o termo *Bioteriais*. Na sua definição, os bioteriais são constituídos por materiais orgânicos ou inorgânicos, como híbridos, os quais são resultado da exploração industrial tecnológica. Constituem actualmente um produto comercializado nas várias áreas científicas, para diversas finalidades, desde as biomedicinas, à agricultura, até às engenharias biotecnológicas, inclusive à Arquitectura.

Na área da Arquitectura, como na da construção, têm surgido significativos exemplos de bioteriais. É o caso do *Biostell*, baseado nas qualidades resistentes da seda produzida pelas aranhas.

Outro exemplo é o *Biopol*, um substituto dos polímeros ou plásticos proveniente do petróleo. Através da união de um gene bacteriano e de uma espécie de planta de mostarda, foi possível criar um substituto viável ao plástico recorrente. Estas são algumas das recentes soluções materiais provenientes da simbiose biológica e material.



**Marcos Cruz, Cyborgian Interfaces, 2005-07**  
 Domestic environment with wall-embedded service-devices.  
 1) Communication Suits: wall-incorporated synthetic neoplasms that integrate new haptic technologies and promote in a physical and virtual manner a tactile engagement of the body in architecture  
 2) Relaxing Cocoons with embedded synthetic neoplasms  
 3) Storage Capillaries  
 4) Gestural Tentacles  
 5) In-wall Seats  
 6) Back access through wall orifices  
 7) External circulation  
 8) Internal circulation  
 9) Technical appliances  
 10) Structure

↑ Fig.57 Projecto de investigação *In-Wall Creatures* de Marcos Cruz. Performance em parede de látex, realizada na Escola Arquitectura de Bartlett.

↓ Fig.58 *Cyborgian* por Marcos Cruz

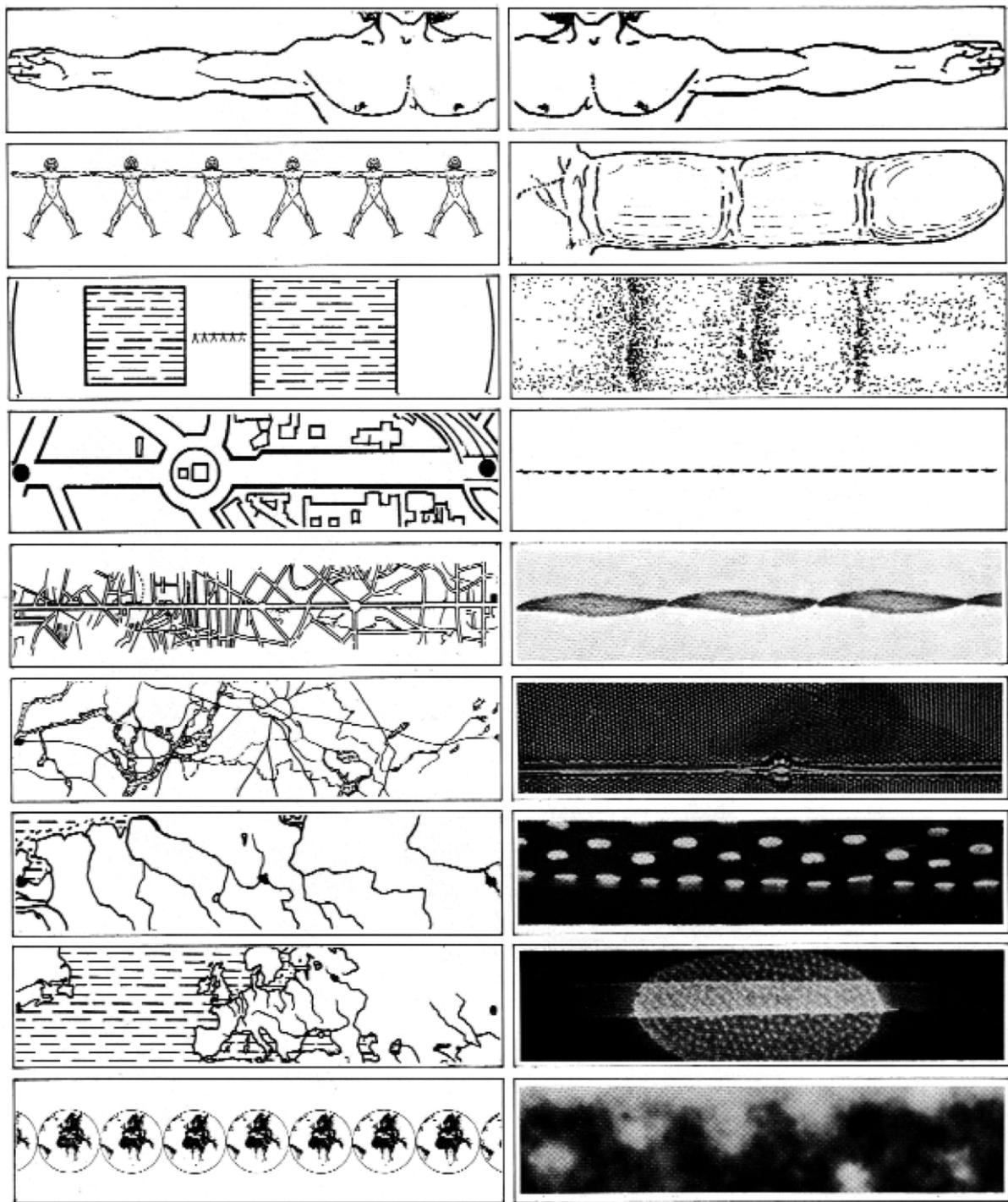
Novas relações têm surgido desta componente biomaterial, relativamente à Arquitectura. Uma nova compreensão entre o corpo humano e o construído começa a ganhar destaque na arquitectura actual. Assim, o que podemos denominar como sistemas espaciais genómicos - a aplicação de biomateriais na construção de um ambiente - tem oferecido uma nova relação biológica entre o corpo, orgânico e o construído.

Marcos Cruz e Marjan Colletti, ambos professores da Bartlett School of Architecture UCL, constituem o *marcosandmarjan architects*. Marcos Cruz, Doutorado pela supervisão do conhecido Peter Cook, antigo membro dos *Archigram*, tem investigado, juntamente com Colletti, uma nova relação orgânica e simbiótica entre a Arquitectura e o corpo humano.

Através da engenharia genética e da biotecnologia, têm procurado criar um organismo arquitectónico capaz de “acolher” o corpo humano de forma mais biológica. As peles e as membranas, tal como os materiais elastómeros e crescímeros, ganham um destaque importante nesta investigação, pela capacidade e compatibilidade que possuem de se fundir com a matéria orgânica (neste caso o corpo humano). Desta forma, existe uma intenção clara de criar um “ventre” capaz de acolher e proporcionar o habitat humano segundo um processo biológico, naturalmente inteligente e simbiótico.

Estes são alguns dos exemplos derivados da exploração bioterial, que têm permitido criar novos horizontes tecnológicos e biológicos nos distintos campos científicos. Esta exploração, embora embrionária em algumas áreas, alerta para o potencial presente na Natureza, pela inquestionável capacidade, que esta tem de criar novas tecnologias e materiais.

A Arquitectura, como as outras ciências que têm evoluído graças à exploração biotecnológica, no seguimento de emergentes resultados obtidos, têm revelado uma potencialidade presente na exploração biológica dos materiais. Novas ferramentas e processos artificiais, digitais e materiais ganham um novo destaque, facilitando, evoluindo e ampliando um novel universo de inúmeras soluções distintas, úteis e viáveis (pelo que não devem ser descartadas). Assim, acreditamos na viabilidade destas novas soluções, sistemas, e processos, e que a continuação da exploração do universo biológico continuará a revelar valiosos resultados tecnológicos ao Homem.



↑ Fig.59 Estudo IL do microcosmo e macrocosmo em escalas progressivas segundo a variação de múltiplos de dez.

### 1.3. Formas e Geometrias da Natureza

*“O universo natural é prolífero em formas, de uma riqueza e exuberância, capazes de escapar à mais hábil e transbordante imaginação humana. No entanto, por detrás desta assombrosa variedade não existe um exercício expresso de «desenho», nem um empenho na originalidade [...] A Natureza aplica os critérios de «organização» e «economia» para desenvolver ferramentas simples que permitam produzir infinitas formas [...]”.*<sup>58</sup>

Desde sempre, a Natureza revelou um complexo sistema de formação capaz de criar processos elaborados, os quais respondem às necessidades e fins específicos “exigidos” pelo universo que habitamos. A sua formação apoia-se nas leis universais, em que fenómenos como o nascimento do Universo, das estrelas e dos planetas são o resultado destes complexos fenómenos de auto-formação.

Estas formas naturais manifestam-se em diferentes escalas, desde a macro-escala de uma galáxia, à micro-escala de um floco de neve. Ainda assim, a variedade de escalas tem uma relação com o nosso planeta, diferente da escala deste planeta com o vasto universo. Ou seja, se considerarmos a Terra como um “macro objecto”, no qual a morfologia de escalas varia entre a decimamilésima parte de um milímetro e os 150 metros (como é o caso das árvores gigantes), apercebemo-nos de que a relação de escalas terrestres nada tem a ver com as distâncias e relação do universo e dos seus elementos.

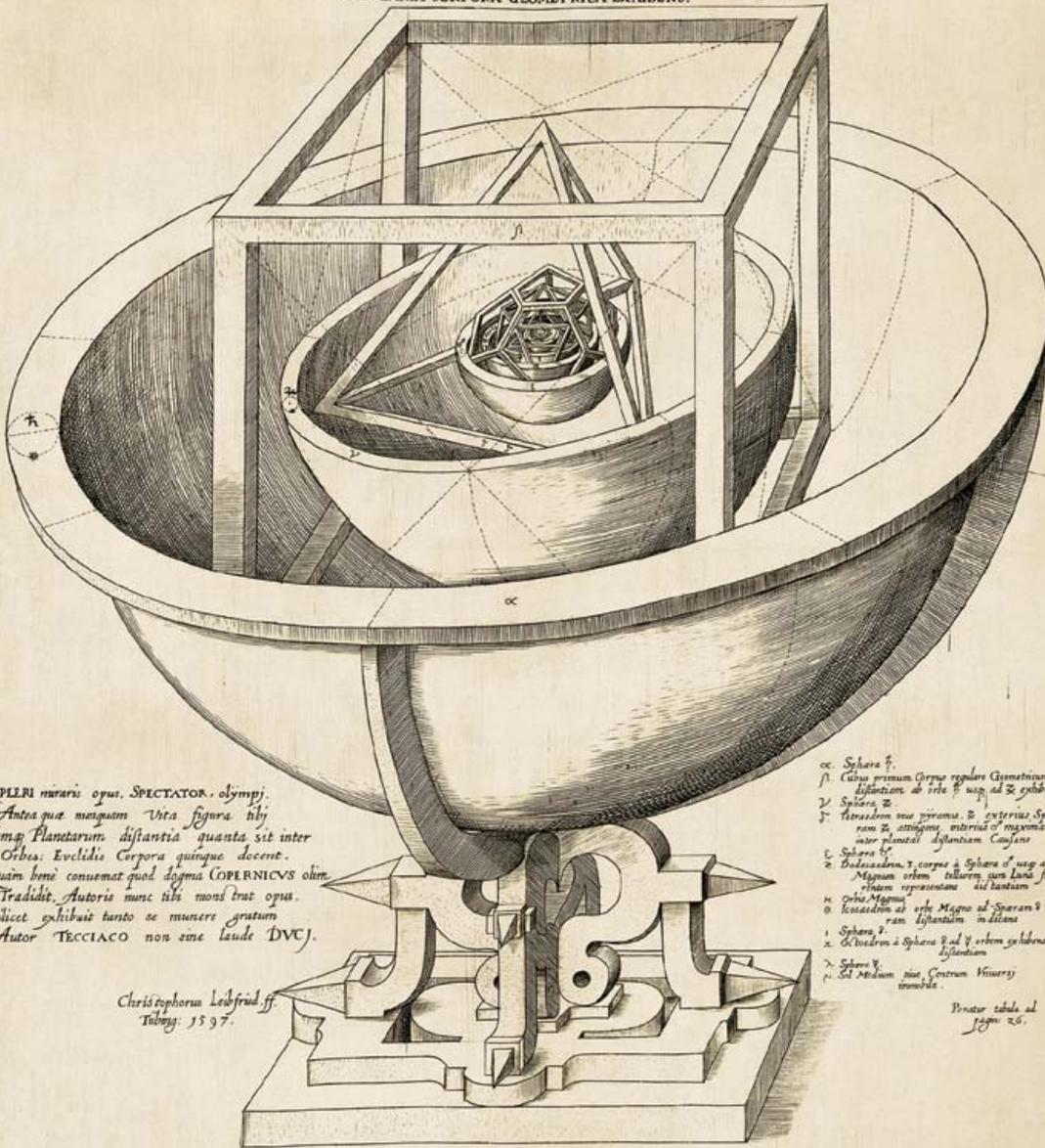
A variedade de formas, escalas e relações desde muito cedo intrigou o conhecimento humano e é através da Geometria que tem sido possível medir e “catalogar” estas formas naturais. Esta ciência evoluiu graças ao contributo de René Descartes com a fusão da Álgebra e Geometria, dando origem à Geometria Analítica e ao sistema de coordenadas que ainda hoje tem o seu nome, tornando-se uma figura-chave da Revolução Científica.

No que respeita à formação de geometrias naturais, estas surgem da interacção de forças e de funções durante a sua formação. Não existe uma geometria predominante, mas sim vários resultados otimizados por um processo de formação

---

<sup>58</sup> CERVERA, M. Rosa; PIOZ, Javier – *Las Formas en la naturaleza*. p.15. [trad. do a.].

TABVLA MORBIVM PLANETARVM DIMENSIONES ET DISTANTIAS PER QVINQVE  
REGVLARIA CORPORA GEOMETRICA EXHIBENS.



KEPLERI mirari opus. SPECTATOR. Olympj.  
Antea quæ nunquam Vitis figura tibi  
Namq; Planetarum distantia quanta sit inter  
Orbes: Euclidis Corpora quinque docent.  
Quam hinc conueniat quod dogma COPERNICVS olim  
Tradidit. Autoris nunc tibi mors traxit opus.  
Sed licet exhibuit tanto se munere gratum  
Autor TECCIACO non esse laude DVCI.

Christophorus Leibfrid. ff.  
Tubing. 1597.

- α. Sphæra 7.
- β. Cæli primum Corpus regulare Geometricum  
distantiam ab orbe 7 usq; ad 2 exhibens
- γ. Sphæra 2.
- δ. Intercedim inter primam & externam Sphæ-  
ram 2. utriusq; viderit 7 magnitudinem  
inter planetas distantiam Causans
- ε. Sphæra 4.
- ζ. Intercedim 7. corpus a Sphæra α usq; ad  
Magna orbem distans. cum Luna se-  
cundam representationem sui tantum
- η. Orbe Magna
- θ. Intercedim ab orbe Magna ad Sphæram 7 ut  
tam distantiam indicans
- ι. Sphæra 1.
- κ. Intercedim a Sphæra 7 ad 4 orbem exhibens  
distantiam
- λ. Sphæra 3.
- μ. Sit Medium inter Centrum Vniuersi  
interioris

Pinxit tabula ad  
paginam 26.

↑ Fig.60 Modelo platónico do Sistema Solar realizado pelo astrónomo alemão Johannes Kepler. Este modelo é publicado na sua obra *Mysterium Cosmographicum* de 1596.

individual, adaptados a uma situação específica, que é responsável pela formação de uma geometria adaptada ao seu fim. Jorge Wagensberg (1948 -) Doutor da Faculdade de Ciências Físicas da Universidade de Barcelona, defende que todas as formas não são equiprováveis, mas sim adquiridas por um processo de formação e de selecção específico, o qual é capaz de influenciar a forma adquirida de um ser ou elemento natural. Wagensberg define assim três tipos de selecção de formas :

*Fundamental* - Tem uma relação directa com os fenómenos físicos básicos da envolvente à qual responde a forma.

*Natural* - relaciona-se directamente com as teorias darwinianas e com o conceito de uma identidade viva, que luta contra o seu meio, desenvolvendo-se como tal.

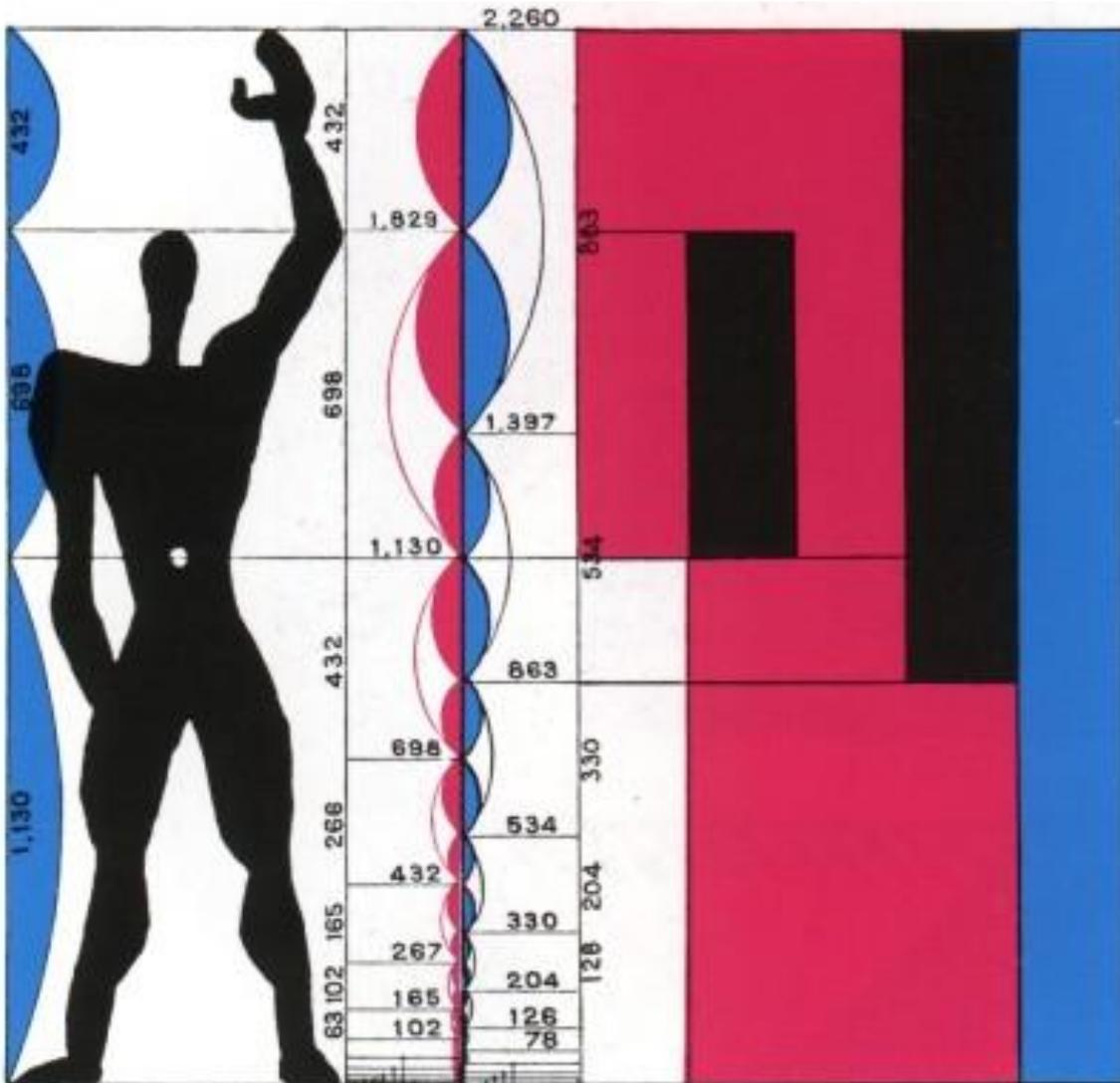
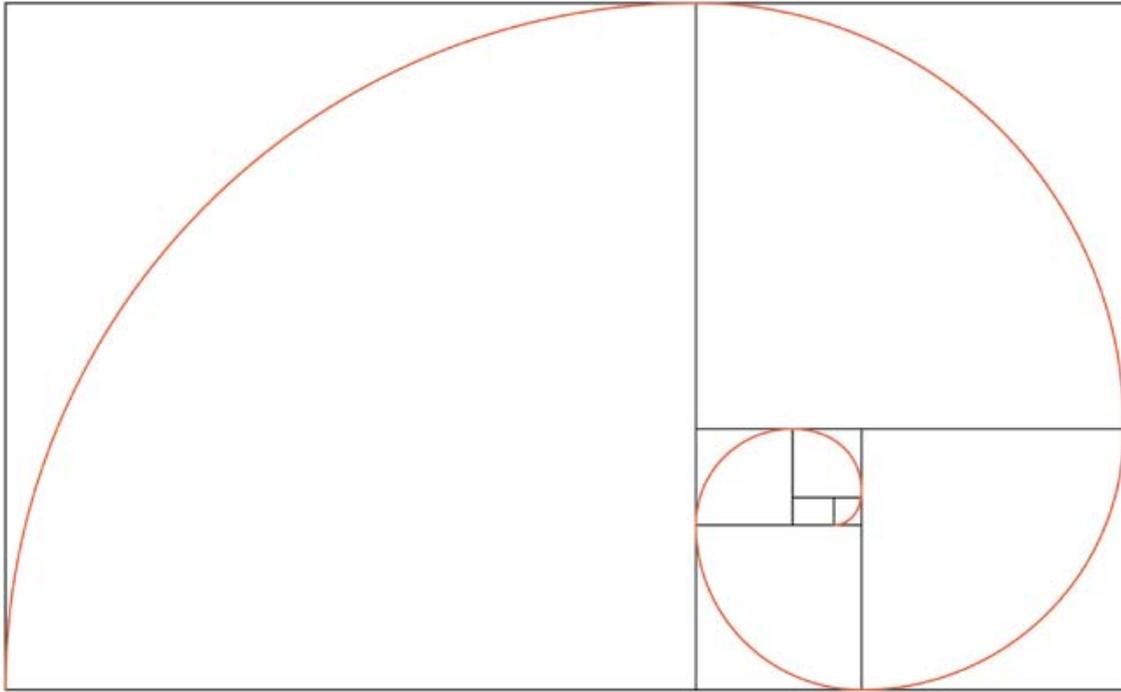
*Cultural* - denominada através da selecção artificial baseada segundo as decisões humanas.<sup>59</sup>

Algumas destas formas naturais acabam por ser estudadas na Arquitectura, reflectindo-se em novos resultados arquitectónicos e também no uso das suas ferramentas - por exemplo, o desenho assistido por computador (CAD).

De entre as várias formas da Natureza deve-se salientar a espiral, uma das formas ausentes da geometria clássica. A sua particularidade reside no factor movimento, concebido através das suas rotação e translação. Estas encontram-se presentes tanto no microcosmos como no macrocosmos do universo natural, dividindo-se em dois tipos: as constantes e as algorítmicas ou também conhecidas como espirais arquemidianas. A sua presença encontra-se em vários exemplos naturais (uma teia de aranha) como o caso das constantes, ou das espirais logarítmicas de Descartes (presentes nos nautilus, caracóis ou mesmo nas nuvens em tempestade). Enquanto que as espirais constantes (tal como o nome indica) têm um crescimento constante, as logarítmicas crescem segundo um somatório das partes, sendo uma parte delas de acordo com a sequência de Fibonacci.

---

<sup>59</sup> Cf. COSTA, Mauro - *Analogías Biológicas en la Arquitectura – Del acercamiento biónico hacia los paradigmas de lo biodigital*. p.71. [trad. do a.].



↑ Fig.61 O Rectângulo Dourado - representação gráfica da proporção áurea.

↓ Fig.62 O *Modulor* de Le Corbusier.

Estas formas estão presentes não só em variados exemplos da Natureza mas também em alguns exemplares arquitectónicos, como o Museu Guggenheim de Frank Lloyd Wright e o monumento à Terceira Internacional de Tatlin.

Este crescimento de proporções algorítmicas, apesar de repetir-se em diferentes exemplos e escalas, é traduzido segundo uma ordem matemática. Esta ordem matemática foi referida pela primeira vez no Ocidente, no início do séc. XIII, da autoria do matemático italiano Leonardo de Pisa (também conhecido por Fibonacci). A sequência de Fibonacci consiste numa sequência infinita de números, em que cada um é igual à soma dos dois números anteriores – 0, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, ... – capaz de exprimir em muitos casos o crescimento “modular” da Natureza, onde se inserem as espirais.

A sequência de Fibonacci também está, de certa forma, presente no sistema modelar de Le Corbusier (*Le Modulor*). O nome surge da palavra *módulo* e *ouro*. Este cresce em conformidade com as leis do rectângulo dourado, o qual pode ser interpretado como uma representação gráfica da sequência de Fibonacci ou também conhecida como *proporção áurea*.

O número  $\phi$  ou *número de ouro*, cujo valor é 1,618, é a proporção próxima do rectângulo dourado, que consiste na divisão de um quadrado em dois rectângulos de partes iguais. O uso destas proporções foi adoptado ao longo da História da Arte, nas várias expressões artísticas como, por exemplo, nas pinturas de Botticelli, e também na Mona Lisa ou no Homem Vitruviano de Leonardo da Vinci.

Através da proporção áurea, Corbusier procurou também criar um conjunto de proporções capaz de unificar a relação entre Homem e espaço, permitindo uma maior proporção e relação destes.

Um estudo feito pelo autor Gyorgy Doczi, publicado com o nome *The Power of Limits: Proportional Harmonies in Nature Art and Architecture*, revela um detalhado estudo de exemplos na natureza, arquitectura e objectos humanos, o qual demonstra a regularidade e frequência em que surgem as proporções do rectângulo dourado, quer nas “construções” naturais, quer nas humanas. Não deixa de ser interessante constatar e estudar esta repetição de proporções de crescimento espiralo, o qual acaba por reger tantos seres, modelos e acontecimentos, de que podemos apreender uma relação de



↑ Fig.63 *Spiral Jetty* de Robert Smithson, 1970.  
↖ Fig.64 Galáxia Espiral.  
↙ Fig.66 Forma espirálica do embrião de um rato.

↗ Fig.65 Exemplo da Proporção áurea numa planta.  
↘ Fig.67 Frondes de um feto.

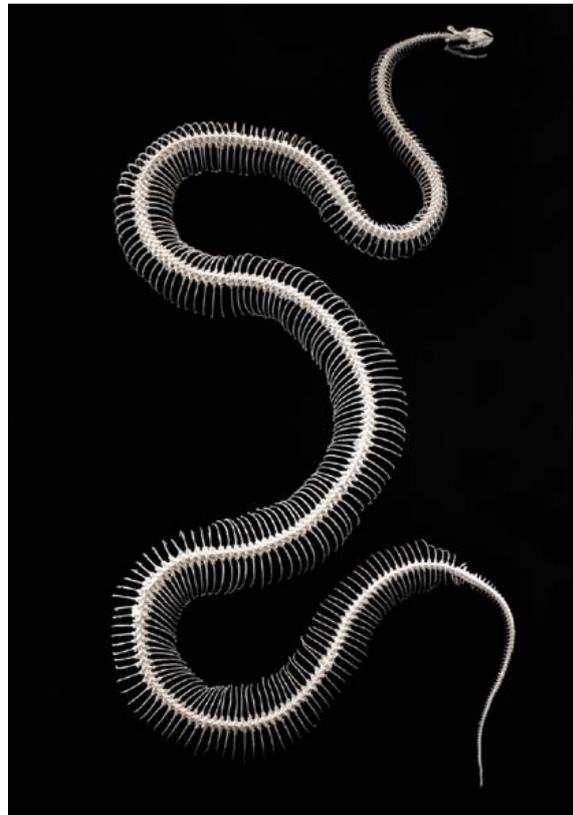
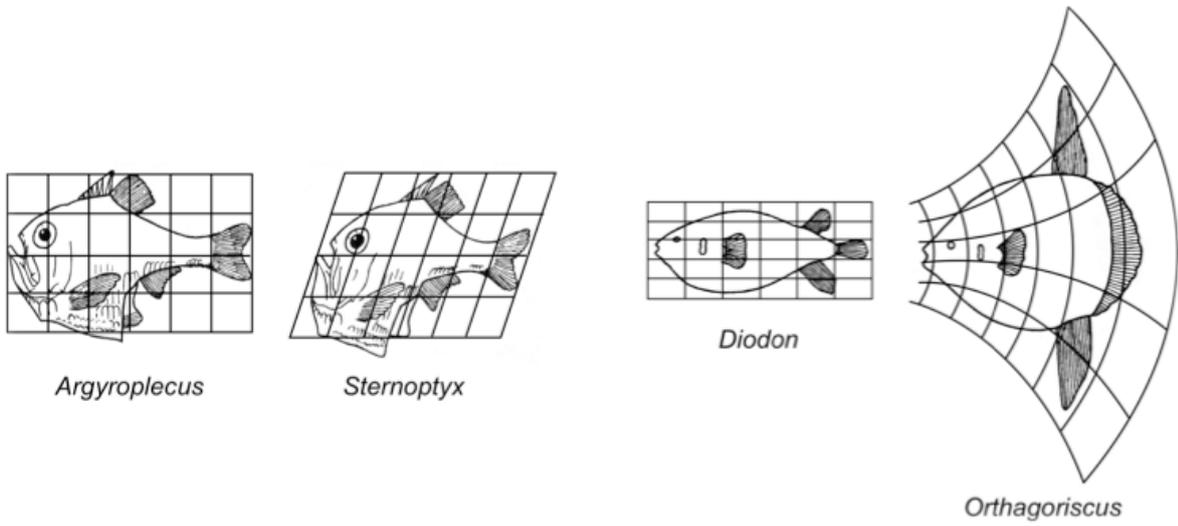
proporções de certa maneira coerente e harmónica com o todo, não só modelada pela Natureza como também pelo Homem.

Se analisarmos grande parte das plantas e também alguns animais inferiores, deparamo-nos com o crescimento espiralo na sua forma. No entanto, este crescimento é organizado segundo o pentágono. Ao observarmos estes exemplos, podemos associar o pentágono ao universo das formas vivas, pois quando observamos as formas da natureza inerte constatamos igualmente que grande parte destas provém não só do hexágono mas também do quadrado. Assim, quando observamos uma cúpula geodésica de Fuller, deparamo-nos com um dodecaedro composto essencialmente por pentágonos. Este constitui a geometria-chave para a sua construção.

O hexágono regular, como geometria construtiva, possui uma facilidade de composição muito superior à do pentágono. Este pode ser dividido em triângulos equiláteros, o que permite oferecer uma facilidade construtiva quando aplicado. Se observarmos, por exemplo, o *Eden Project*, reparamos como a malha é constituída por hexágonos, no entanto esta é subdividida em triângulos. Neste exemplo geodésico em concreto deve-se salientar que, em certos pontos, foi necessário utilizar pentágonos para a união das formas adjacentes. Sem estes, a configuração geodésica deste projecto não seria possível.

A simetria surge nos poliedros regulares como o elemento regedor destas formas geométricas. Todos os “edros” constituem, quando divididos, o reflexo de um dos lados. O *mirror*, que tanto utilizamos no CAD, é realizado também na geometria euclidiana, como nas formas vivas. Deste modo os poliedros encontram-se directamente relacionados com o círculo. Ao observarmos a representação do Homem Vitruviano, bem como o conceito ancestral chinês do quadrado inserido no círculo (através desta união resulta a representação cosmológica do Céu e da Terra - *Gai Tian*), é possível observar graficamente esta relação.

O círculo ou esfera, quando falamos a três dimensões, é uma forma predominante na Natureza. Desde a micro escala das células à macro escala dos planetas, esta é repetida inúmeras vezes nas formas vivas. Podemos afirmar que é o principal elemento regedor das formas vivas, como também o mais ancestral.



↑ Fig.68 Exemplos de deformações paramétricas por ação do meio. D'Arcy Thompson.  
 ↙ Fig.69 A assimetria do Homem.  
 ↘ Fig.70 Exemplo da simetria interna de uma cobra.

*“As construções da natureza viva baseia-se num sistema de construção único, relativamente simples: a célula. Os organismos unicelulares, plantas, animais mais complexos e os homens, são todos feitos de acordo com o mesmo sistema de construção.”*<sup>60</sup>

Esta, tal como os poliedros, é inevitavelmente simétrica, pois que a simetria consiste essencialmente na delimitação de um eixo e a reprodução de um dos lados é realizado de forma idêntica no outro. Simetria deriva do grego *summetria* que significa *harmonia de proporções*. No entanto, o conceito de simetria difere nas diferentes ciências. Os matemáticos e físicos descrevem a simetria de forma diferente da dos arquitectos e biólogos. Citando Ian Stewart: “As simetrias são as que observamos nos fragmentos naturais do grande universo de simetrias...[?]”.<sup>61</sup>

Apesar das diferentes perspectivas científicas, as simetrias e padrões estão presentes na Natureza através das leis da Física e da Matemática, pelo que se encontram profundamente ligadas aos processos de formação da natureza viva e inerte. São divididas da seguinte maneira:

*Simetria espelho* – como o nome indica, é concebida através do efeito espelho;

*Simetria rotacional* – rotação simétrica através de um ângulo;

*Simetria de translação ou deslizamento* – movimento de linha recta;

*Simetria rotacional e reflectiva* – virando e “espelhando”;

*Reflexão de deslize* – movimento de linha recta e espelho;

*Simetrias ornamentais* – outras combinações de simetrias básicas ou ornamentos.<sup>62</sup>

Na flora podemos encontrar vários exemplos de simetria. A forma cónica simétrica das árvores ou a simetria reflectiva das folhas são alguns dos exemplos de simetria floral. Nas flores também podemos constatar a presença da simetria, que regularmente

---

<sup>60</sup> OTTO, Frei - *Architecture et Bionique: Constructions naturelles*. p.19. [trad. do a.].

<sup>61</sup> Cf. GRUBER, Petra - *Biomimetics in Architecture: Architecture of life and buildings*. p.102. [trad. do a.].

<sup>62</sup> GRUBER, Petra - *Biomimetics in Architecture: Architecture of life and buildings*. p.102. [trad. do a.].



conjuga a simetria reflectiva juntamente com a simetria rotativa pentagonal, sendo o resultado mais predominante nestes exemplos.

A simetria pentagonal, relativamente à fauna, apenas é encontrada em organismos marinhos invertebrados. A locomoção dos animais, tal como a gravidade, são factores fundamentais na distribuição da simetria animal, pelo que os factores simétricos são aplicados de forma diferente.

Na natureza inerte, um dos exemplos mais relevantes é a formação de cristais. Neste exemplo há que ter em consideração que a simetria exterior é baseada em função da simetria interior, a qual é determinada pelo alinhamento dos átomos e moléculas.<sup>63</sup> Outro exemplo (e possivelmente um dos exemplos esteticamente mais apelativos) é o das formações de flocos de neve. É curioso notar que, embora a forma dos flocos seja diversificada, constatou-se na actualidade que os vários resultados de simetrias e por sua vez, de geometrias, constituem uma geometria fechada. Ou seja, através do seu estudo verificou-se que possuem um número limitado de geometrias básicas com as quais se constroem todas as composições, reflectindo um total de 80 exemplos distintos.<sup>64</sup>

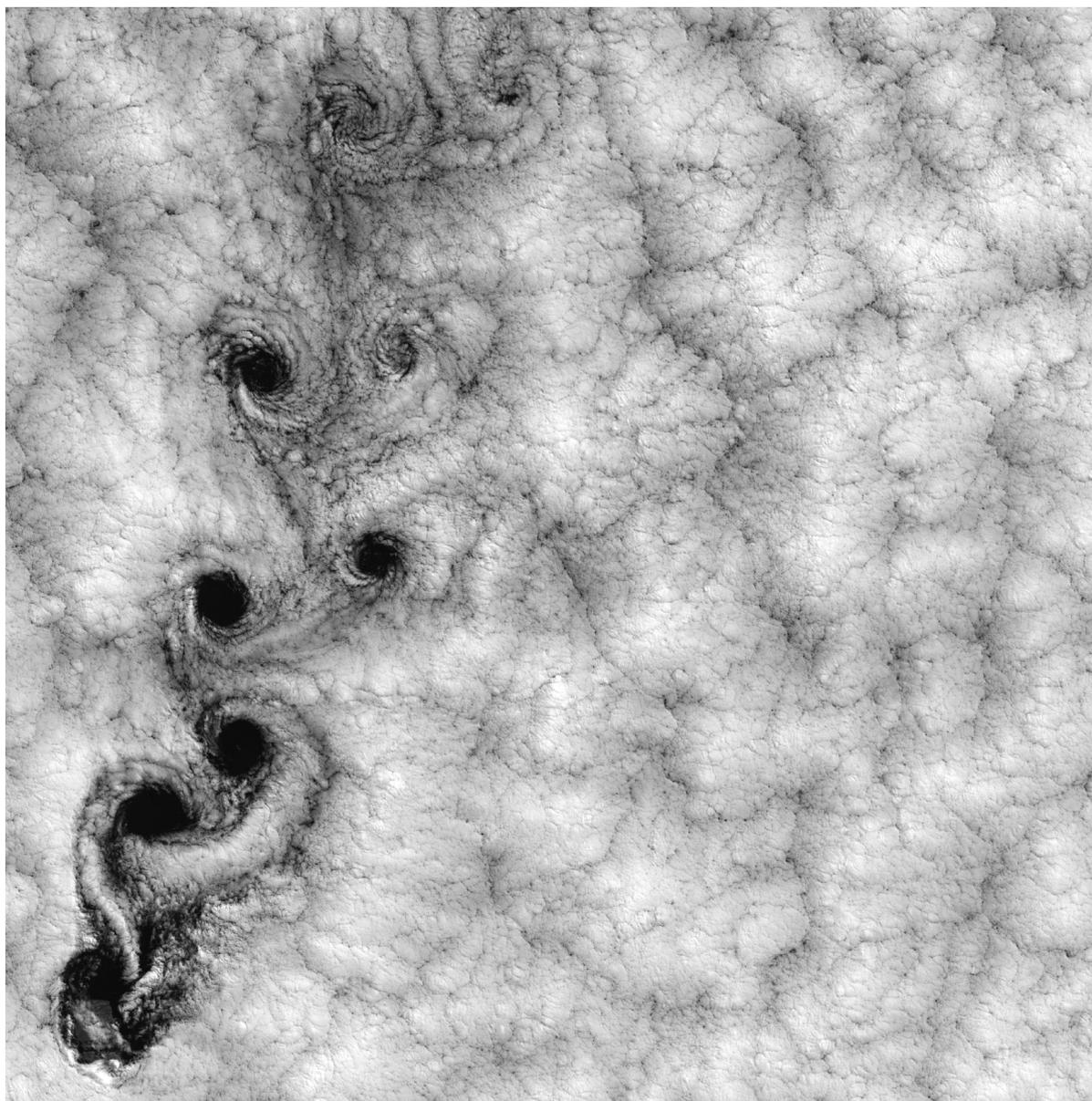
Na Arquitectura, tal como na natureza humana, a simetria é um factor constante presente em inúmeros exemplos. Desde os exemplos arquitectónicos da Grécia Antiga até ao exemplos oferecidos pelo Renascimento, é possível observar o uso constante da simetria, especificamente a simetria bilateral. Por outro lado, se avaliarmos a simetria ao nível formal e, sobretudo, ao nível estrutural, o uso da simetria poderá (em grande parte dos casos) oferecer maiores viabilidade estrutural e facilidade construtiva.

O equilíbrio estético e composicional que a simetria oferece revela-se como um elemento predominante para a harmonia estética dos produtos construídos pelo Homem. Desta forma, segundo Claudi Alsina, a natureza humana revela uma fixação pela simetria, que, é percebida segundo os variados factores cognitivos e culturais presentes no Homem. Este processo cognitivo, acostumado à regularidade e percepção lógica, absorve a simetria como um elemento tranquilizante, capaz de poupar ao Homem o esforço

---

<sup>63</sup> GRUBER, Petra - *Biomimetics in Architecture: Architecture of life and buildings*. p.102.

<sup>64</sup> O primeiro estudo classificativo das geometrias básicas dos flocos de neve foi realizado pelo físico japonês Ukichiro Nakaya. Segundo a classificação de Nakaya existiam 41 tipologias geométricas distintas. Posteriormente, em 1966, os meteorologistas C. Magono and C. W. Lee completaram a classificação de Nakaya, distinguindo 80 tipologias geométricas. Esta classificação é ainda utilizada, nos dias de hoje.



↖ Fig.71 Couve Romanesca.

↑ Fig.72 Exemplo fractal da flor de Girassol.

↗ Fig.73 Ramificações fractais do glaciar Susitna no Alaska.

↓ Fig.74 Padrão fractal von Karman vortex street.

cognitivo durante a contemplação de algo assimétrico, ou algo inarmónico aos parâmetros cognitivos da mente humana.

Através da geometria fractal é possível observar uma “nova” composição geométrica. O estudo dos fractais, embora presentes em inúmeros exemplos da Natureza, resulta da abordagem matemática e científica experienciada nas últimas décadas, tal como dos estudos obtidos na investigação da *Teoria do Caos*. A criação destes exemplos tornou-se possível graças aos avanços tecnológicos da Informática e dos estudos realizados nas áreas que implicam a Estatística.

É através do matemático francês Benoit B. Mandelbrot, que surge o termo fractal (derivado do latim *frangere*) e, com ele, novas tipologias de composições geométricas. Os fractais são possuidores de uma variedade infinita de formas, geralmente compostas segundo padrões torcidos, irregulares e exponencialmente crescentes. Assim, um fractal pode ser definido como a repetição de uma forma específica, que, é repetida exponencialmente de forma infinita. Se fizermos o *zoom* (*in* ou *out*) de uma imagem fractálica, constatamos a presença da mesma forma, repetida a diferentes escalas.

Na Natureza podemos observar vários exemplos elucidativos da geometria fractal, tais como as nuvens, os raios, as montanhas, as dunas, as linhas costeiras, as árvores, as flores, os rios ou os sistemas arteriais. Os fractais possuem uma particularidade que os distingue das outras geometrias – as dimensões fraccionárias. Enquanto que os sólidos possuem um número limitado de dimensões, a geometria fractal poderá oferecer várias dimensões fraccionárias, repetidas a diferentes escalas. Esta característica demonstra a razão por que têm sido “excluídos” da geometria euclidiana e considerados como elementos individuais no estudo da Geometria.

Na Arquitectura, um dos exemplos mais constante da geometria fractal é a ramificação das formas. Seja o sistema de ramificação presente nas árvores, nas plantas ou nas nervuras das folhas, é possível observar e com ele apreender soluções capazes de grande eficiência estrutural. Se observarmos a arquitectura gótica ou a arquitectura Gaudiana, deparamo-nos com a presença de elementos estruturais ramificados, que possibilitam uma melhor distribuição das cargas exercidas pelos objectos arquitectónicos.

Le Corbusier também recorre ao conceito de ramificação para a decomposição hierárquica dos problemas arquitectónicos. Podemos considerar a visão hierárquica de Corbusier como uma árvore, em que os problemas da arquitectura, do urbanismo, da



determinação das funções e classificação destas últimas, surgem dispostos segundo a sua prática arquitectónica, com a devida hierarquia.

Seria incontornável não mencionar Frei Otto e a utilização da ramificação de elementos: através das técnicas e estudos realizados ao longo da sua obra, como será exposto no próximo capítulo, utilizou a geometria fractal nos exercícios e projectos de estruturas ramificadas, tal como nos caminhos mínimos. Através desta ramificação fractal, foi possível otimizar parte das suas estruturas ao nível da forma, da estrutura, da matéria e, por consequência, da eficiência energética.

As formas e geometrias da natureza é um tópico constante na obra de Frei Otto, que estudou e observou, de forma exaustiva, ao longo da sua carreira. Esta variedade prolífera de formas geométricas constitui, em muitos dos seus exemplos, o ponto de partida e a base da sua arquitectura. Através do estudo das geometrias e formas naturais, acreditamos que influenciou imperativamente o resultado e o conjunto dos exemplos valiosos, que tem oferecido ao longo da sua existência.



#### 1.4. Analogias Biológicas na Arquitectura

A observação de fenómenos naturais terrestres possibilita um novo conhecimento, capaz de oferecer novas soluções ao mundo arquitectónico. Esta observação surge inicialmente com uma componente visual muito forte, influenciando as primeiras explorações biológicas. Mais tarde, e com um conhecimento mais profundo da Biologia, tornou-se claro que o uso destas soluções não passa só pela cópia de formas naturais, mas também pela imitação de sistemas vivos. Desde uma macro até uma micro escala, investigadores e arquitectos têm reunido novos conhecimentos, mais complexos do que inicialmente se constatava. Esta complexidade constitui um “obstáculo” evidente, que tem permitido evoluir e descodificar novos processos biológicos e, ao mesmo tempo, exigido uma investigação exaustiva e por vezes inconclusiva na descodificação de certos “mistérios” da Natureza. Assim, todos os avanços neste universo até à data surgem com o seu devido preciosismo, e têm contribuído para uma melhor compreensão e aplicação das analogias biológicas.

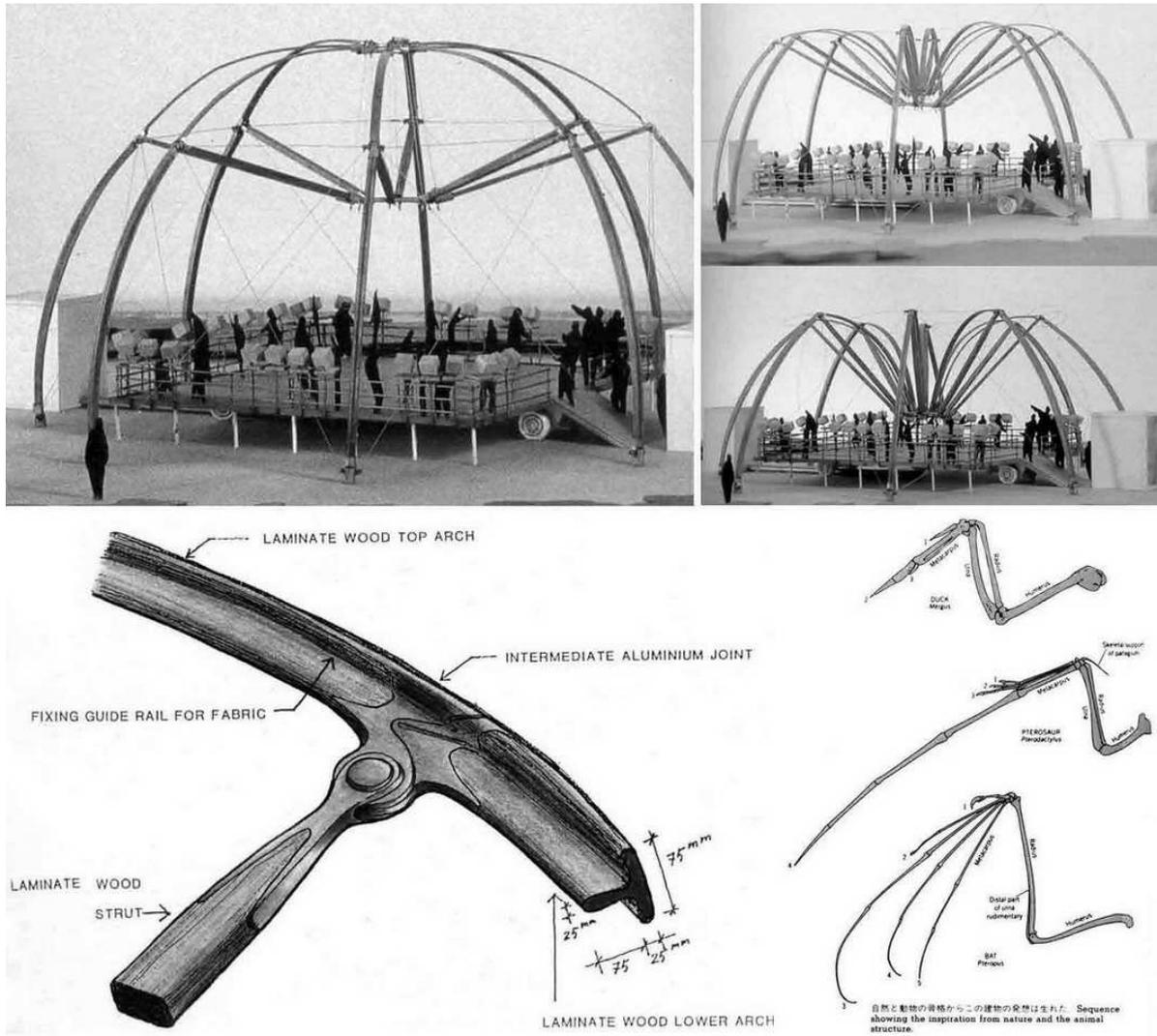
*“[...] a comparação entre duas coisas, tipicamente na base da sua estrutura e para propósito de explicação ou comparação.”<sup>65</sup>*

A analogia tem sido um tema abordado desde a antiguidade clássica por filósofos como Aristóteles e Platão. A analogia era vista como uma abstracção compartilhada, em que os objectos análogos partilham uma ideia, um padrão, uma regularidade, um atributo ou uma função. O uso de comparações, metáforas e imagens alegóricas também pode ser interpretado como um argumento válido e, por sua vez, como uma analogia.<sup>66</sup> A arquitectura construída muitas vezes segundo um modelo metafórico permite-nos concluir que estas metáforas são precedidas de uma analogia e, por seu turno, estas analogias são possuidoras de um modelo teórico direccionado para a abstracção.

---

<sup>65</sup> New Oxford American Dictionary, program version 1.0.1, 2005. [trad. do a.].

<sup>66</sup> COSTA, Mauro - *Analogias Biológicas en la Arquitectura – Del acercamiento biónico hacia los paradigmas de lo biodigital*. p.58.



↑ Fig.76 Exemplo de uma analogia formal entre as asas dos vertebrados e um modelo de arquitectura por Renzo Piano.

Nachtigall frisa a importância das analogias como a primeira etapa científica da investigação - ponto de partida dos estudos.<sup>67</sup> A sua aproximação permite um ponto de partida capaz de ordenar e direccionar o pensamento arquitectónico, ultrapassando a primeira fase de criação. Através de uma ou várias regras, gestos ou intenções, que ordenam o pensamento arquitectónico, é possível estabelecer um fio condutor ao longo da execução do projecto. Deste modo, as analogias e metáforas auxiliam quer o sentido tecnológico, quer o sentido cognitivo, na medida em que mobilizam recursos técnicos, sociais e naturais.<sup>68</sup>

A analogia ganha um carácter capaz de vencer problemas e clarificar o nosso raciocínio, assim como ajuda na tomada de decisões, nos diferentes campos da criação, percepção e criatividade. Da sua aplicação resulta um amplo conjunto de soluções, aplicadas de forma diferente em conformidade com o interesse e conteúdo de cada ciência.

Relativamente à Biologia, e de acordo com o tema estudado ao longo da dissertação, uma analogia torna-se válida se duas componentes idênticas ou similares possuírem a mesma função ou informação. Um bom exemplo arquitectónico é o do observatório de Santiago Calatrava da *Cidade das Artes e Ciências*, em Valência, onde o mecanismo de abertura do edifício é feito de harmonia com as leis e estrutura de um olho humano.

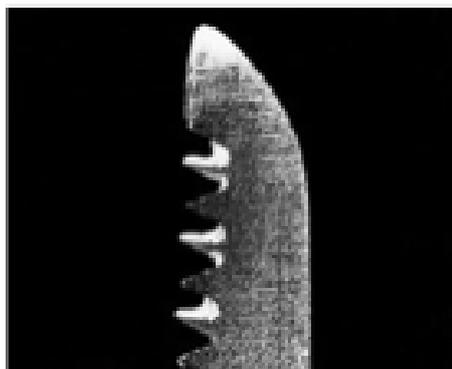
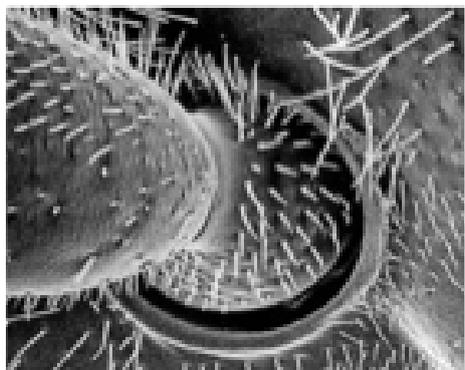
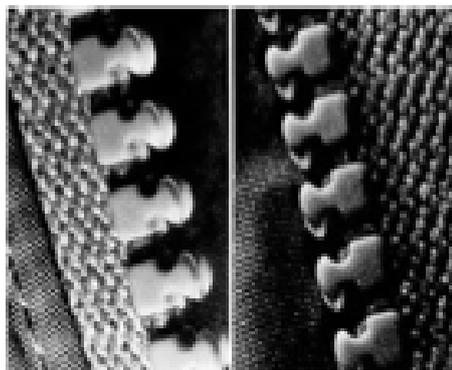
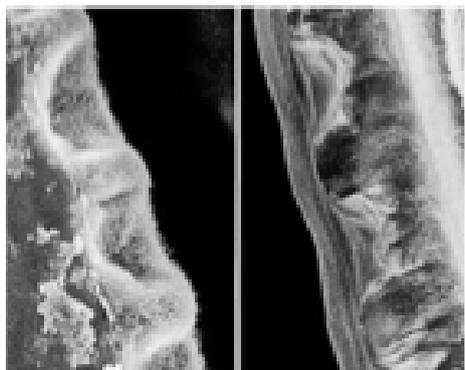
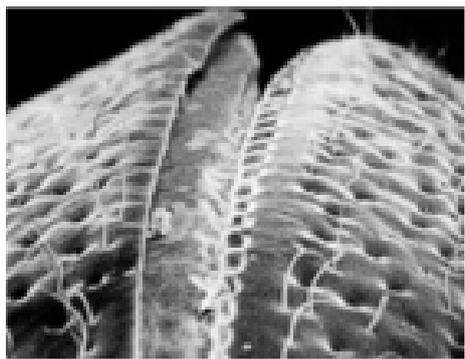
De acordo com o trabalho de Mary Hesse, podem dividir-se em analogias formais ou materiais. As primeiras surgem como resultado da assimilação das formas ;as segundas são resultado do cruzamento entre a semelhança e casualidade de um evento.

A aproximação realizada através do uso de analogias biológicas encontra-se presente nas áreas da arquitectura, engenharia ou design, em que são projectados protótipos físicos análogos a outros objectos físicos. A analogia surge como um recurso capaz de facilitar o processo de criação e de experimentação de um determinado objecto, possibilitando uma maior percentagem de sucesso durante a sua construção. Seguindo o pensamento de Juri Lebedew "*[...] o produto de um esforço de longa data de funções semelhantes em organismos diferente é uma semelhança concreta*

---

<sup>67</sup> Cf. GRUBER, Petra - *Biomimetics in Architecture: Architecture of life and buildings*. p.42.

<sup>68</sup> COSTA, Mauro - *Analogias Biológicas en la Arquitectura – Del acercamiento biónico hacia los paradigmas de lo biodigital*. p.58.



↑ Fig.75 Analogias biológicas presentes em diferentes objectos criados pelo Homem.

*estrutural.*<sup>69</sup> Então funções semelhantes necessitam de estruturas semelhantes, que podem ser identificadas ou solucionadas segundo a observação de analogias biológicas.

A fonte de inspiração análoga pode ser considerada como a informação presente no mundo da Biologia, desde que esta informação possa ser aplicada a um fim específico da arquitectura ou de um determinado objecto. Apesar do interesse desta nova “ferramenta análoga” tanto nas áreas da arquitectura como nas de Design, constata-se um maior avanço de técnicas e soluções biológicas na área do design. Isto deve-se possivelmente à menor necessidade dos objectos de design responderem a fins complexos e específicos, que se manifestam-se frequentemente na Arquitectura. A questão de habitar e usar um espaço arquitectónico impõe condicionantes diferentes ao uso de uma determinada peça de design. Não queremos diminuir o valor do Design nos dias de hoje, mas simplesmente acreditamos que, devido a condicionantes diferentes, o uso das analogias biológicas aplica-se de forma diferente, existindo maior liberdade no Design. Os métodos e soluções divergem de autor para autor, como de área para área, no entanto a Biologia surge sempre como elemento comum a todos.

Carmelo di Bartolo separa as analogias segundo a análise de sistemas e de funções, diferindo como análises horizontal e vertical, respectivamente. A primeira é fundamentada no estudo das relações entre elementos naturais, procurando constatar a independência existente nestes elementos. A segunda apoia-se na observação das qualidades funcionais dos elementos biológicos, capazes de reunir variantes naturais viáveis, solucionando problemas funcionais específicos, como, por exemplo, flexibilidade, resistência, mobilidade, e outras componentes.

Também destaca o papel importante da analogia entre Charles Darwin e a teoria da evolução natural das espécies e, por consequência, o confronto do método evolutivo com o método criativo. Através da observação das soluções funcionais da natureza, a fluidez do mundo natural surge como elemento capaz de influenciar, regular e desbloquear o método criativo, tão necessário na Arquitectura. A diversidade, direcção e evolução das espécies surge como exemplo capaz de mostrar ao arquitecto como deve projectar o artificial. Esta fluidez presente na Natureza deverá ocupar os mecanismos mentais do arquitecto, oferecendo a possibilidade de usar os conceitos biológicos ao seu dispor.

---

<sup>69</sup> Cf. GRUBER, Petra - *Biomimetics in Architecture: Architecture of life and buildings*. p.42. [trad. do a.].



*“[...] o projectista do artificial deve estar disposto a mudar as relações entre os factores que estão em jogo para adaptar-se a novas situações [...] Uma postura tão dinâmica e adequadamente metabolizada na mentalidade do projectista, passa a ser a principal garantia da capacidade de pensar correctamente na inovação [...]”*<sup>70</sup>

Franco Lodato, outro investigador que tem contribuído para a aplicação de analogias biónicas ao design, acredita que as estruturas vivas surgem como soluções de desenho à maior parte dos investigadores, as quais evoluíram para cumprir distintas funções de acordo com a eficácia pretendida.

*“Os desenhos mais avançados da natureza têm como objectivo comum a harmonização da forma e da função, conseguidas mediante o equilíbrio das forças externas e internas que interagem no sistema natural e na integração de diversa funções da forma.”*<sup>71</sup>

A pesquisa e obra de Frei Otto também recorrem à investigação de analogias biológicas. No entanto, Otto divide esta pesquisa segundo duas aproximações distintas - analítica e sintética. Enquanto a aproximação analítica avalia as semelhanças e o desenvolvimento de processos, a aproximação sintética desenvolve processos experimentais de auto-organização, com a finalidade de comparar o resultado com o papel dos modelos da Natureza.<sup>72</sup> Através dos modelos físicos análogos demonstra as forças geradoras de forma, as quais variam em função do material e do mecanismo de construção. Frei Otto afirma que *“[...] objectos semelhantes podem ser iguais na forma, na construção, na estrutura e no material. Eles podem ter adquirido esta analogia através processos de desenvolvimento idênticos, semelhantes ou completamente diferentes. O processo de desenvolvimento revela-se um elemento chave na investigação de analogias. Este é a grande diferença entre os produtos artificiais tipicamente técnicos e as criações da natureza inanimada. No entanto, o processo de selecção é muita das vezes semelhante, bruto...e, as analogias artificialmente desenhadas chamadas de*

---

<sup>70</sup> DI BARTOLO, Carmelo - *Natureza como modelo, natureza como sistema*. p.42-43. [trad. do a.].

<sup>71</sup> LODATO, Franco - *Biónica: la naturaleza como herramienta de innovación*. p.48. [trad. do a.].

<sup>72</sup> Cf. GRUBER, Petra - *Biomimetics in Architecture: Architecture of life and buildings*. p.43.



*analogias triviais.*”<sup>73</sup> A sua investigação revela como através da vasta pesquisa e de uma forte componente experimental, foi possível utilizar as analogias biológicas em prol da Arquitectura, unindo Natureza e tecnologia. Esta investigação será exposta no próximo capítulo, no qual a explanação de técnicas, modelos, tecnologias e resultados melhor definem a obra de Frei Otto.

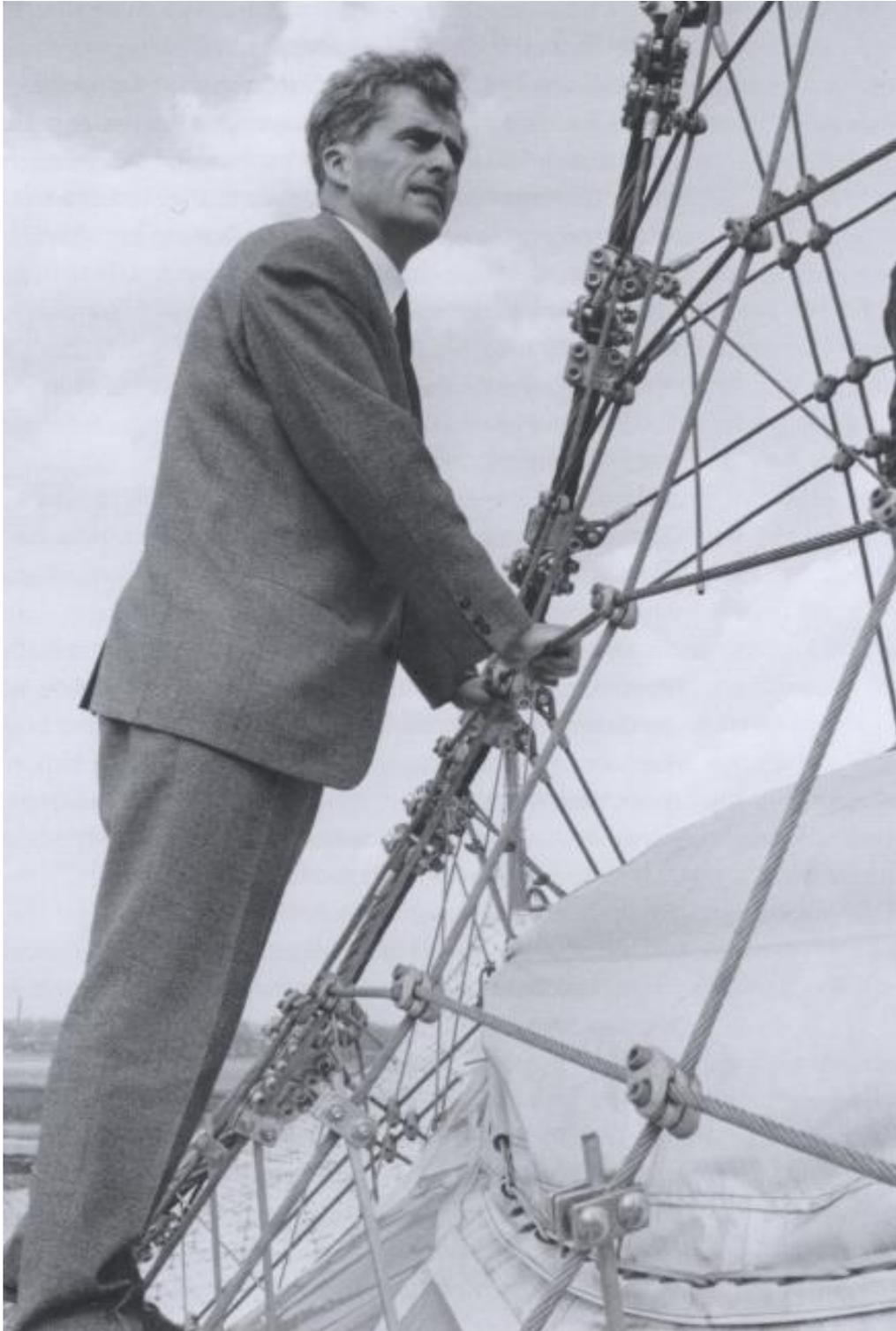
---

<sup>73</sup> Cf. GRUBER, Petra - *Biomimetics in Architecture: Architecture of life and buildings*. p.43. [trad. do a.].



## **II. Frei Otto e Biologia:**

grupos, técnicas e processos de busca da forma



↑ Fig.77 Frei Otto no Pavilhão Alemão da Exposição Mundial de Montreal de 1967.

## 2.1. Conhecer Frei Otto

Frei Otto nasceu a 31 de Maio de 1925 em Siegmarsdorf, perto da cidade de Chemnitz, estado de Sajonia, Alemanha.

Arquitecto de renome mundial e com uma carreira muito peculiar, tem-se destacado no ramo da investigação em que novas ideias, técnicas e recursos arquitectónicos revelam um interesse único pelo progresso da Arquitectura Contemporânea. Com uma grande variedade de temáticas (alvo das suas investigações ao longo da carreira), destacam-se os princípios das estruturas leves, as abóbadas de celósia, as estruturas tensionadas e o estudo da forma através de processos físicos de auto-geração.

Para entender as suas bases experimentais e metodológicas tão peculiares, é necessário não só mencionar as influências do pai e do avô, ambos escultores, mas também a necessidade insaciável de inventar que patenteou desde os oito anos, como o próprio afirma. Inventar é “[...] desde criança uma diversão ou uma obsessão; tinha que estar sempre inventando e construía os inventos mais curiosos que nada tinham que ver com arquitectura. [...] Trata-se de algo muito lógico, que está no ar, mas é absurdo levar a cabo demasiado cedo, antes que chegue o momento e pessoas adequadas. Um invento tem sempre que apresentar-se no momento e lugar adequado e mediante as pessoas adequadas; se não se proporcionam todas estas condições, o invento fracassa.”

74

Esta dinâmica de carácter pessoal contribuiu para uma participação frenética de vários projectos, grupos e objectos de investigação e também reflectiu-se num conjunto de resultados tão distintos que caracterizam a sua obra.

Otto utiliza variados recursos a seu dispor para a prática arquitectónica, sendo a maquete talvez o objecto mais convencional. Através da construção exaustiva de inúmeros modelos, Frei Otto adoptou “religiosamente” o uso desta ferramenta que se tornou um dos instrumentos essenciais para as suas pesquisa e obra.

Também se apoia no uso de sistemas não convencionais (como os sistemas “imateriais”, baseados nos campos magnéticos), nos sistemas materiais de formas instáveis (como os líquidos, os gasosos, os viscosos ou os plásticos), permitindo, através

---

<sup>74</sup> SONGEL, Juan Maria - *Frei Otto. Conversación con Juan Maria Songel*. p.37. [trad. do a.].



da capacidade de modelação destes, uma arquitectura mais criativa, viva e orgânica, mas também não tão “rígida” como a maioria dos exemplos a que estamos habituados.

Outro ponto essencial para uma melhor compreensão da sua metodologia, é a contínua investigação na busca da forma, e por consequência, do princípio de construção ligeira. Estes processos encontram-se presentes em inúmeros exemplos naturais ou artificiais e surgirão várias vezes ao longo desta dissertação.

Não há dúvidas de que Frei Otto foi um dos arquitectos pioneiros nos processos da forma e estrutura na Arquitectura. A Natureza constituiu a extensa “base de dados” para a maior parte das suas obras/investigações e foi através dela que se consagrou como um arquitecto polivalente nas diversas áreas das ciências. Recriou a imagem do arquitecto, revelando-se uma figura peculiar capaz de ligar a arquitectura à fronteira das ciências. Hoje podemos definir Frei Otto como arquitecto, engenheiro, cientista, biólogo ou matemático, mas sobretudo um experimentalista.

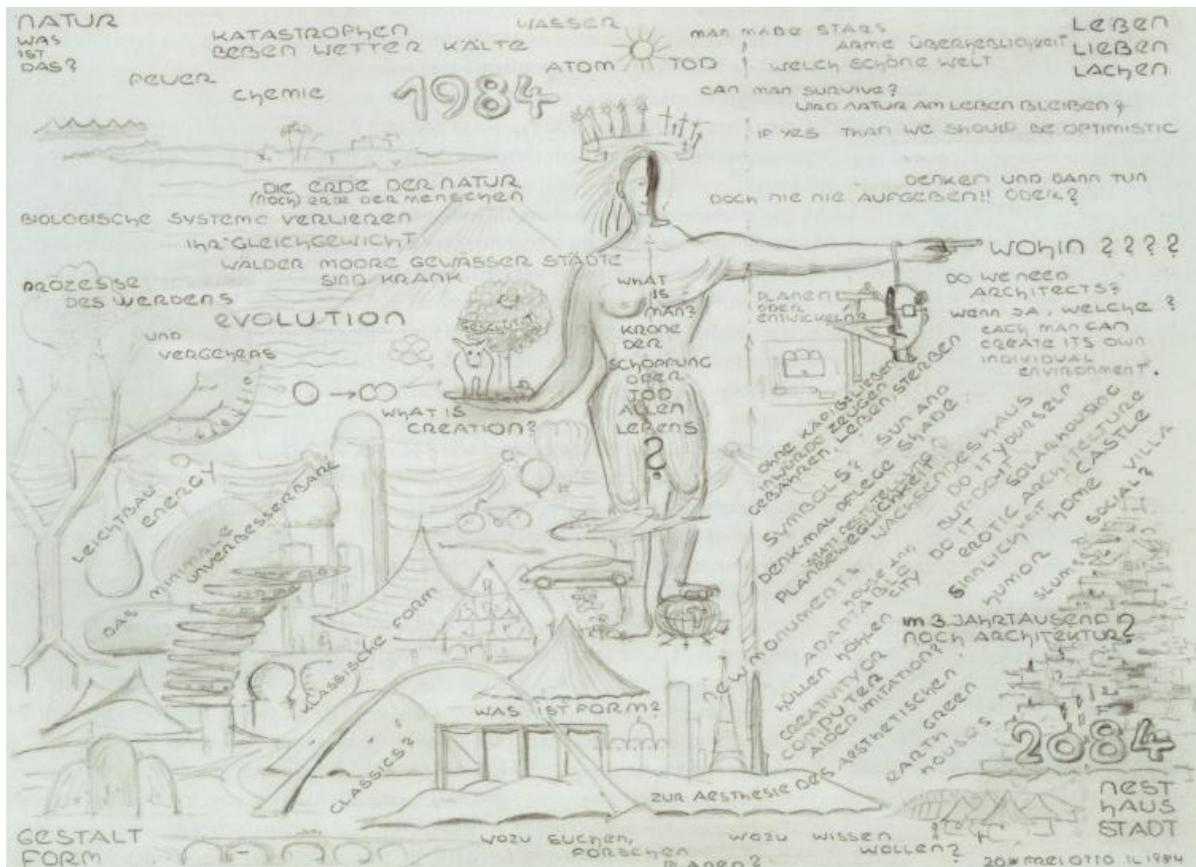
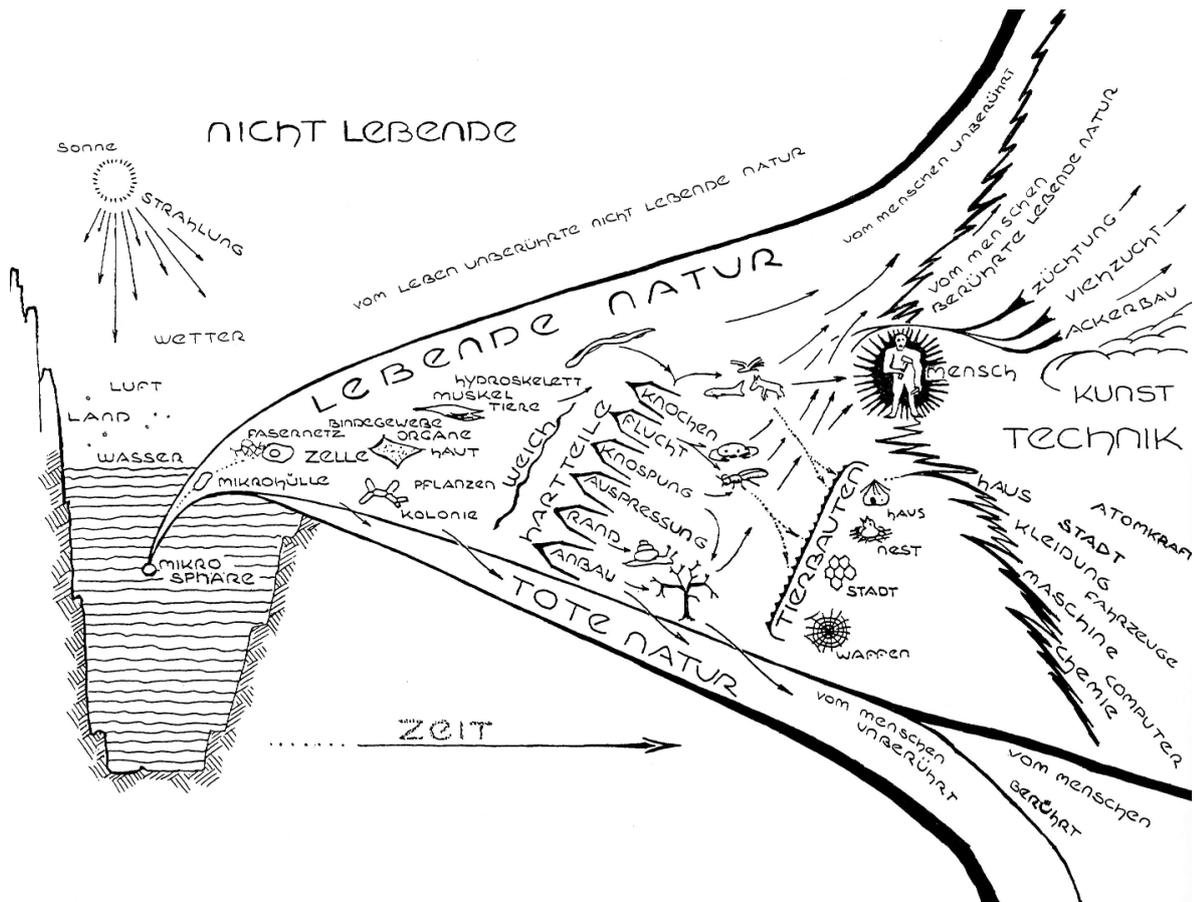
Esta componente experimental despertou-nos grande interesse, que procuramos estudar e expor ao longo desta dissertação através das suas investigações, objectos de estudo, técnicas e tecnologias utilizadas para a criação de uma arquitectura “diferente”.

*“O arquitecto está sozinho no âmbito das ciências naturais, pois já não existe a figura do cientista generalista. Assim pois, sem ser no sentido convencional, tem que actuar como cientista.”<sup>75</sup>*

Frei Otto

---

<sup>75</sup> SONGEL, Juan Maria - *Frei Otto. Conversación con Juan Maria Songel*. p.9. [trad. do a.].



↑ Fig.78 Esboço representativo do universo das formas naturais. Frei Otto.

↓ Fig.79 "Nature, what is that? - living, loving, laughing". Esboço de Frei Otto

## 2.2. “Bio-Otto”

*“Na actualidade, o arquitecto desentende-se voluntariamente das ciências naturais, mas comete um grave erro pois a construção é uma ciência da natureza aplicada.”*<sup>76</sup>

Frei Otto

O nome deste capítulo surge da união entre Biologia e Otto. A sinergia de duas palavras que, ao analisarmos as suas obra e percurso, se nos depara com a presença contínua ao longo da sua notável contribuição para a Arquitectura e Engenharia. Esta sinergia percorreu toda a sua carreira, reflectindo uma arquitectura única, com resultados e experiências tão surpreendentes e inovadores no universo da arquitectura como no da engenharia.

Já há 30 anos afirmava-se que, segundo a voz de Otto, a *“Biologia tornou-se indispensável para a arquitectura – mas a arquitectura também tornou-se indispensável para a biologia.”*<sup>77</sup> Esta ideia, ainda hoje contestada e/ou ignorada por alguns dos praticantes, continua a ser tópico de debate e alvo de críticas (positivas ou negativas), de estudos e de exercícios que procuram demonstrar o potencial presente nas soluções do mundo natural. Em muita das vezes, esta relação é confundida com os conceitos de ecologia e sustentabilidade na Arquitectura.

No entanto, e se continuarmos a seguir a linha de pensamento “Ottiana”, a arquitectura do natural não implica a prática de uma arquitectura ecológica, mas sim a prática de soluções ou conceitos capazes de catalisar e improvisar uma arquitectura melhor. Frei Otto acredita que, através da observação da natureza viva e inerte, podemos aproveitar e compreender mecanismos e processos de formação, como a relação entre forma e função ou forma e massa, além de outros, criando assim uma arquitectura mais eficiente.

Segundo Frei Otto devemos *“[...] observar constantemente. Em primeiro lugar observar as formas da natureza inerte e ver o que sucede nela, pois as formas da natureza viva, que também estudei, são muito mais complexas, quase impenetráveis e*

---

<sup>76</sup> SONGEL, Juan Maria - *Frei Otto. Conversación con Juan Maria Songel*. p.62. [trad. do a.].

<sup>77</sup> Cf. NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p.45. [trad. do a.].



*opacas.*”<sup>78</sup> Dado o grau de complexidade presente nas formas vivas, a investigação de Otto tem início no estudo da natureza inerte e só mais tarde é que dá início ao estudo da natureza viva.

*“[...] embora tenha tentado compreender os processos de geração de formas na biologia. Não obstante, as minhas primeiras experiências não estavam relacionados com a biologia. Eu estava interessado nos processos geradores de formas na natureza inerte, tais como as nuvens ou dunas eram formadas. Era óbvio para mim que estes processos poderiam ser utilizados em edifícios.”*<sup>79</sup>

Também será necessário mencionar a influência subsequente do biólogo berlinense Johann Helmcke, que foi o responsável por introduzir Frei Otto na aparência das formas presentes nos organismos microscópicos, e também o “alertou” para a pesquisa em que, durante prolongados anos, procurou explicar a origem das formas biológicas.

Assim, Frei Otto consciente do potencial presente nestes fenómenos terrestres, dá início à sua longa e debatida pesquisa. A utilização destes “fenómenos” para fins construtivos não deixa de estar relacionada directamente com a componente construtiva e, por consequência, com a relação sinérgica entre Arquitectura e Biologia. Se observarmos todos os organismos, verificamos que são possuidores de uma “arquitectura celular”, que os “constrói” e dá corpo à sua forma. Compostos por células, acopladas entre si, tornam-se um mecanismo construtivo capaz de suportar os vários resultados da Natureza.

Este acto primordial de construção natural pode ser considerado como o primeiro sistema construtivo da Natureza, presente em todos os organismos vivos e, por mais variado que possa ser, une todos os seres, desde os unicelulares até ao *Homo Sapiens Sapiens*. Esta ideia unitária, base da construção natural, está presente, consciente ou inconscientemente, na arquitectura de Frei Otto, que afirma *“Todos os objectos materiais são estruturas.”*<sup>80</sup>, as quais procurou entender e adaptar.

---

<sup>78</sup> SONGEL, Juan Maria - *Frei Otto. Conversación con Juan Maria Songel*. p.36. [trad. do a.].

<sup>79</sup> “AD : Architectural Design”. London : Wiley Academy. 2004, 74:3. p.20. [trad. do a.].

<sup>80</sup> Cf. NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p.17. [trad. do a.].



*“Estou interessado nos problemas fundamentais da arquitectura[...] e a construção é a base de toda a arquitectura.”<sup>81</sup>*

Da mesma forma que procura entender os problemas e a base de toda a arquitectura, a principal preocupação não se traduz apenas na pesquisa de exemplos específicos da variedade infinita de objectos provenientes das construções naturais, mas também nas construções e formas que possuem clareza física, biológica e técnica capaz de erguer tais objectos.

*“O conhecimento da evolução individualizada das formas em todas as áreas da natureza, da técnica e da arte joga um papel importante; é um terreno onde o arquitecto tem o seu novo grande feito. Se não conhece os processos da evolução da forma, o arquitecto carece do controle do seu próprio fazer. Deve conhecer a diferença entre o que faz e o que ocorre nos processos autónomos.”<sup>82</sup>*

Seguindo este princípio, Frei Otto realizou vários estudos regidos por um conceito denominado por ele próprio como *Opposite Path* (Caminho Oposto). Este exercício serviu para clarificar, desmistificar e compreender os processos responsáveis pela formação de construções naturais. O Caminho Oposto consiste essencialmente na construção de um modelo técnico e, através do seu processo de busca da forma, com ele é possível obter conhecimento capaz de explicar as formas biológicas.<sup>83</sup>

*“[...] construimos maquetas para conhecer a forma e, uma vez obtida, construimos também maquetas para saber o que ocorre no seu interior. Sem dúvida, as maquetas mais interessantes são as que geram formas optimizadas pelo tipo de construção da maquete; em primeiro lugar trata-se de construir maquetas que produzam formas físicas para mais tarde demonstrar, mediante outro tipo de maquetas, que aquilo se pode construir.”<sup>84</sup>*

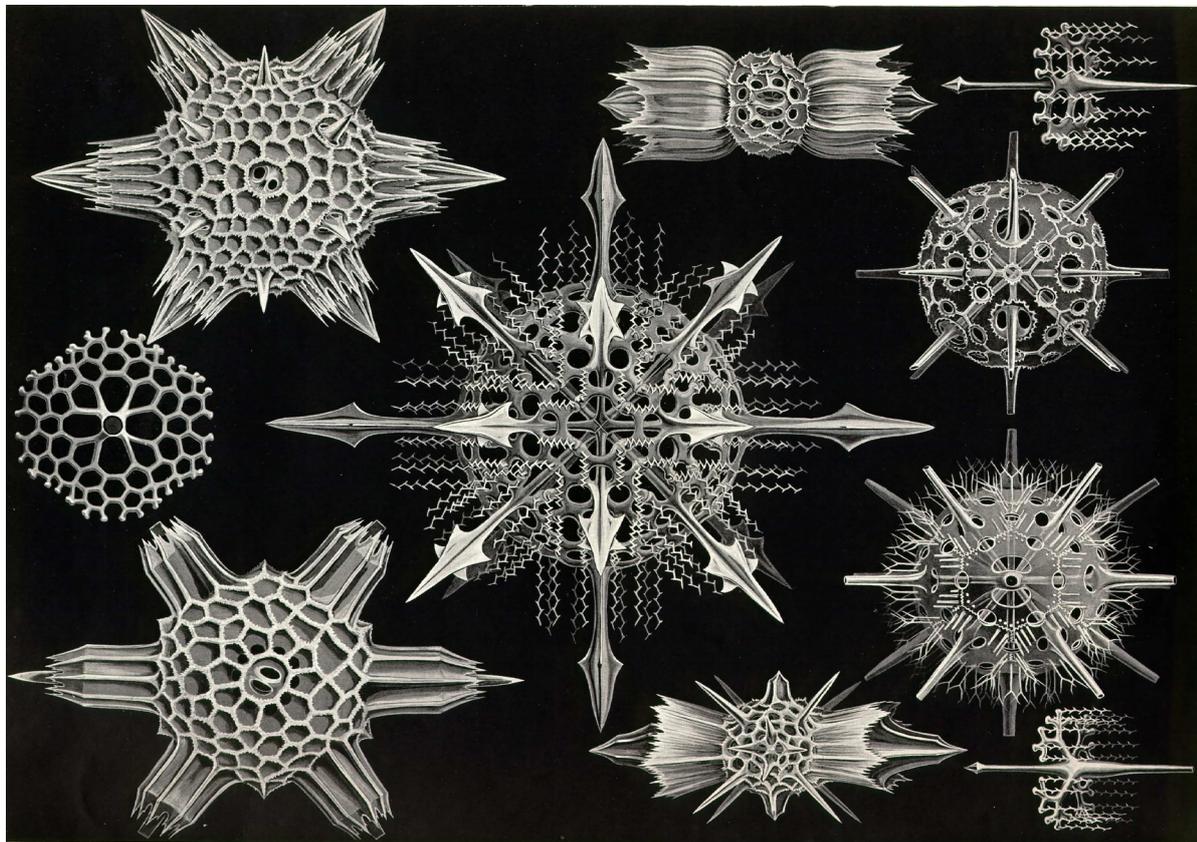
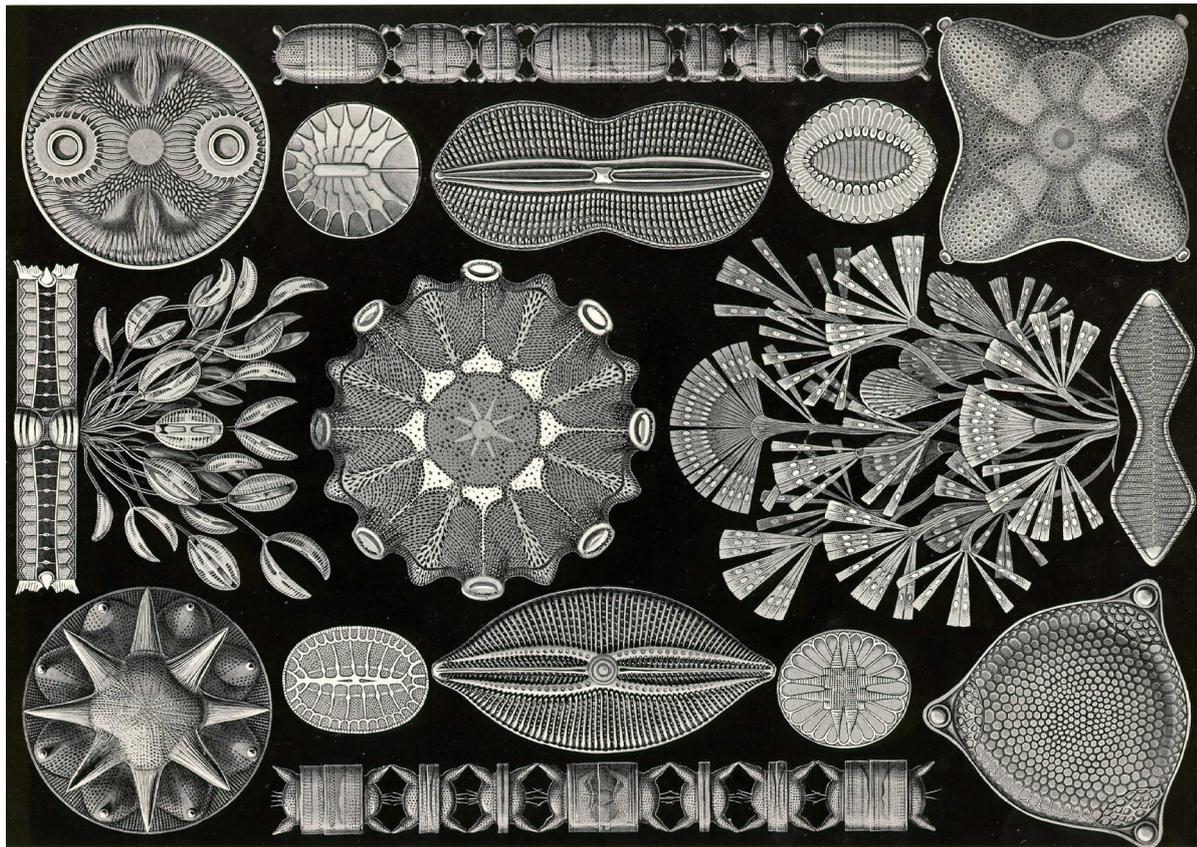
---

<sup>81</sup> Cf. NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p.17. [trad. do a.].

<sup>82</sup> SONGEL, Juan Maria - *Frei Otto. Conversación con Juan Maria Songel*. p.8. [trad. do a.].

<sup>83</sup> NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p.45. [trad. do a.].

<sup>84</sup> SONGEL, Juan Maria - *Frei Otto. Conversación con Juan Maria Songel*. p.48. [trad. do a.].



↑ Fig.82 Ilustração de Diatomáceas (*Bacillariophyta*) do biólogo alemão Ernst Haeckel, na obra *Kunstformen der Natur*.  
 ↓ Fig.83 Ilustração de Radiolários da sub-família *Acanthophracta*. Ernst Haeckel.

Assim, não só o processo construtivo é assimilado, como existe uma melhor compreensão da relação necessária entre a função, a forma e a massa. Esta relação biológica já tinha sido estudada pelo biólogo D'Arcy Wentworth Thompson com a publicação da obra *On Growth and Form*. Embora realizado no campo da biologia, este estudo revela a relação entre massa e forma nos organismos vivos.

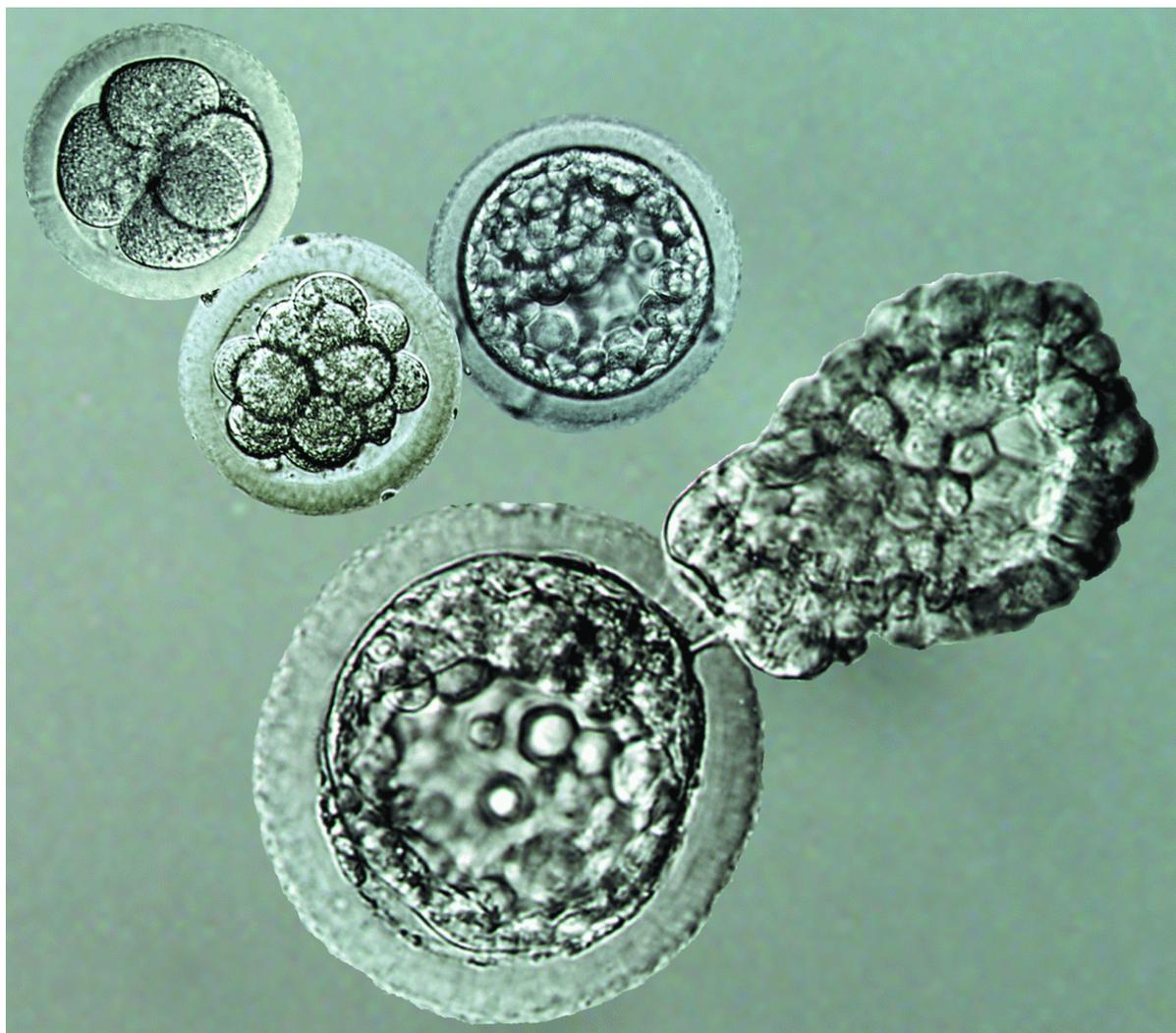
*“A forma de um objecto é definida quando conhecemos a sua magnitude, real ou relativa, segundo as suas várias direcções.”*<sup>85</sup>

A colaboração contínua de Otto com Helmcke também revelaria novos resultados perante a capacidade construtiva da Natureza. A partir de 1961, este trabalho em conjunto permitiu compreender e reformular o conceito de construções ligeiras, alicerçado nas construções naturais observadas. A observação microscópica das diatomáceas e dos esqueletos dos radiolários possibilitou concluir que, através das formas concebidas segundo estes processos de auto-formação, eram criadas sob as mesmas forças que a tecnologia humana utiliza. A evolução natural, a física e a química responsabilizam-se por tais formações e a reutilização destas “fórmulas” é transposta para as nossas construções segundo um processo análogo. O Caminho Oposto poderá ser então considerado como pesquisa de analogias naturais, capazes de entender e transplantar as fórmulas da natureza para resultados arquitectónicos.

Estas analogias foram utilizadas por Frei Otto a diferentes níveis e técnicas construtivas, que posteriormente serão desenvolvidas e descritas nesta dissertação. Por agora pretendemos apenas salientar a relação entre algumas destas técnicas e a Biologia, e alguns princípios biológicos presentes na obra e pensamento de Frei Otto - temas directamente influenciados pela observação da Natureza viva e inerte.

---

<sup>85</sup> THOMPSON, D'Arcy - *On Growth and Form*. p.15. [trad. do a.].



↑ Fig.84 As várias fases de desenvolvimento das células somáticas humanas.  
↓ Fig.85 Esboço de uma cobertura pneumática para uma ilha. Frei Otto,1967.

### 2.2.1. O conceito pneu

As células constituem um mecanismo primário de “construção”, integrado por uma membrana celular exterior e preenchida com um fluído (neste caso, líquido capaz de se moldar às pressões a que são submetidas) e este princípio básico de funcionamento nada mais é do que o exemplo do princípio básico das estruturas pneumáticas utilizadas na Arquitectura. Embora inicialmente Frei Otto tenha designado este tipo de estruturas como pneumáticas (derivadas da palavra *pneu* proveniente do significado grego – *ar*), posteriormente distinguiu-as das estruturas líquidas, atribuindo-lhe um novo termo - *Hydro*.

No entanto, se observarmos todos os organismos, constatamos que são constituídos por pneus agregados em diferentes formas e hierarquias. Quer no reino animal, quer no vegetal, esta composição de células disposta em camadas é constituída por células mais e menos resistentes, capaz de originar diferentes estados de resistência. As membranas exteriores das células vegetais, normalmente compostas por celulose, podem ser fortalecidas com um processo de acumulação de lignina, criando-se um dos materiais nobres da arquitectura, a madeira. No que diz respeito ao reino animal, o tecido celular possui outros elementos estruturais na sua composição, tais como cartilagens, ossos ou (no caso dos insectos) de quitina, fazendo com que a sua formação e distribuição sejam diferentes.

A forma das células tende a variar segundo a forma e função dos organismos, embora a forma primitiva e elementar da célula seja a esfera. Para além da forma, tendem a ser mais ou menos resistentes. A resistência parte da ligação fibrosa produzida pela constituição das células, que absorvem as pressões às quais são submetidas. Assim, para uma maior resistência, será necessário uma maior constituição fibrosa. Frei Otto foi capaz de constatar este fenómeno, aplicando-o às estruturas ligeiras. Se a pressão de uma estrutura for equitativamente constante, a constituição fibrosa necessária para submeter estas pressões será tridimensionalmente idêntica para todas as formas.<sup>86</sup>

Os animais multicelulares simples tendem a possuir uma constituição de um pequeno número de pneus rijos; a sua estabilidade resulta da alternante configuração

---

<sup>86</sup> NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p.46.



de pneus, designado como hidroesqueleto. Os compostos por uma constituições de pneus rijos são comuns aos animais possuidores de esqueleto e, se ainda possuírem um revestimento exterior rígido, como é o caso dos insectos, possuem um exoesqueleto. Se os pneus rígidos se encontrarem no interior do animal, formam um endoesqueleto, tais como as estruturas de ossos dos animais vertebrados.<sup>87</sup>

Exemplos de exoesqueletos e endoesqueletos podem ser encontrados respectivamente nos seres unicelulares radiolários e nas diatomáceas. Seres estes que formaram grande parte das investigações de Helmcke que, através do já referido estudo microscópico, apercebeu-se de que a formação das diatomáceas era composta por pequenas bolhas, criando um espaço construído entre elas, o qual era responsável pelas suas forma e sustentação estrutural. Estes sistema pneumático inter-espaçado possuía assim outro sistema rígido reforçado através de uma rede de resistência fibrosa das células.<sup>88</sup>

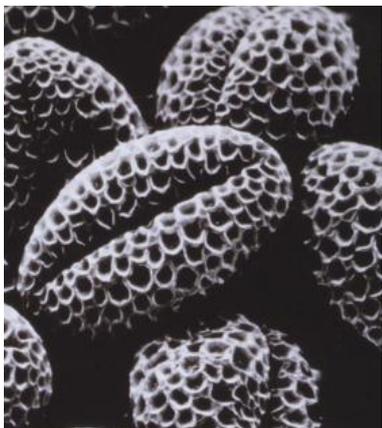
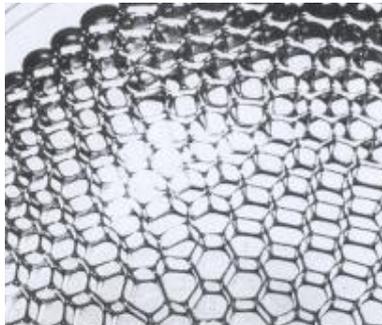
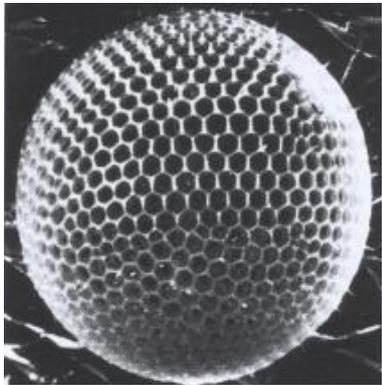
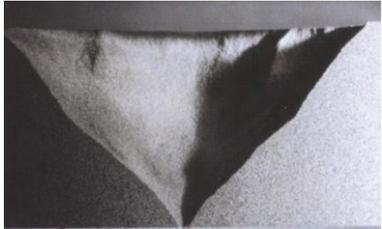
A existência do que hoje em dia é vulgarmente reconhecido como citoesqueleto, foi reconhecida por Frei Otto há 30 anos, a o aperceber-se deste reforço fibroso estrutural das células e, ao mesmo tempo, que quando a formação destas aumenta a estrutura fibrosa acompanha este aumento. Assim e por analogia, deduzimos que, para o aumento de uma construção pneumática, a sua estrutura de união deverá acompanhar este aumento. Esta relação permite não só melhorar o desempenho estrutural de um edifício, mas também reduzir a relação entre os seus custo e eficiência. Tal como os edifícios, os organismos celulares possuem um melhor desempenho e gasto energético se esta relação for equilibrada. São factores decisivos para a sua formação e estão presentes desde a sua génese.

É necessário ter em consideração que este processo de formação é influenciado pelas pressões internas e externas a que está submetido, revelando-se como um factor decisivo para as estruturas pneu. Assim, tal como na Natureza, a Arquitectura deve ter em conta o equilíbrio entre a forma, a estrutura e as condições periféricas desta, criando formas capazes de traduzir um melhor desempenho face a estas variantes, pois a Natureza já nos ensinou como melhorar este equilíbrio e sua performance.

---

<sup>87</sup> NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p.47.

<sup>88</sup> *idem*.



↑ Fig.86 Pirâmide de Quéops. Egipto.

← Fig.88 Formação "borbulhosa" de um radiolário.

↓ Fig.90 Redução das partículas de polén causadas pelo processo de secagem.

↖ Fig.87 Estudo com areia de auto-formações piramidais.

↙ Fig.89 Estudo de borbulhas de sabão numa esfera.

### 2.2.2. O Caminho Oposto

O Caminho Oposto foi um exercício desenvolvido por Frei Otto, capaz de, através do processo inverso, aproximar-nos às origens e causas responsáveis pelas formas naturais. Este exercício permite-nos não só ganhar uma nova percepção das formas da Natureza viva, como também uma melhor compreensão dos processos responsáveis pelas formas do universo inerte.

Será necessário mencionar que os objectivos do Caminho Oposto são regulados pelos mesmos objectivos utilizados pela Engenharia inversa. A Engenharia inversa (*Reverse Engineering*) é um termo mecanicista que consiste “[...]no processo de extracção de conhecimento ou desenho técnico de qualquer coisa feita pelo Homem”<sup>89</sup> segundo uma investigação de ordem decrescente (*top down approach*). Actualmente é aplicada em diferentes áreas tecnológicas, ganhando destaque nas áreas computacionais.

Esta metodologia serve diferentes finalidades e, embora os casos de estudo entre o artificial e o natural (investigação científica) sejam diferentes, os seus princípios metodológicos de investigação revelam grande similitude.<sup>90</sup> Na investigação de fenómenos naturais, revela-se uma complexidade muito superior à dos produtos humanos tornando-se necessário traduzir as “codificações” herdadas do processo de evolução e de desenvolvimento da vida orgânica, implicando desta forma uma investigação mais aprofundada.

Constata-se, portanto, que a investigação da Natureza viva e a extracção das suas tecnologias implica quer o estudo da evolução (*EVO*), como o Desenvolvimento (*DEVO*) por força das condicionantes externas.

A *Evo-Devo* ou Biologia evolutiva do desenvolvimento consiste num campo emergente da Biologia que tem como principal objectivo “[...]estabelecer as bases

---

<sup>89</sup> ELLAN, Eldad; CHIKOFISKY, Elliot J. - *Reversing: Secrets of Reversing Engineering*. p.3. [trad. do a.].

<sup>90</sup> “O conceito tem existido muito antes dos computadores ou da tecnologia moderna e provavelmente remete para os dias da revolução industrial. É muito similar à investigação científica, em que o investigador tenta trabalhar fora do desenho técnico do átomo ou da mente humana. A diferença entre engenharia inversa e a investigação científica convencional é que, com a engenharia inversa o artefacto em investigação é feito pelo Homem, ao contrário da investigação científica em que é um fenómeno natural. A engenharia inversa é normalmente conduzida para obter conhecimento perdido, ideias e filosofias de design quando tal informação está indisponível.[...]Tradicionalmente, a engenharia inversa tem incidido sobre desmontar invólucros e dissecá-los fisicamente para descobrir os segredos dos seus designs.” In. ELLAN, Eldad; CHIKOFISKY, Elliot J. - *Reversing: Secrets of Reversing Engineering*. p.3. [trad. do a.].



*genéticas das grandes inovações evolutivas ou, dito de outra forma, relacionar as mudanças que se localizam na origem dos grandes grupos com mudanças em padrões especiais ou temporais de expressão dos genes relevantes para o desenvolvimento. É importante assinalar que a Evo-Devo não refuta de modo algum o neodarwinismo, senão que completa-o no marco de uma teoria evolutiva muito mais compreensiva.”<sup>91</sup>*

*Através da Evo-Devo é possível “[...] traçar as modificações das estruturas através de vastos períodos de evolução temporal - observa como as barbatanas dos peixes foram modificadas para membros nos vertebrados terrestres, como sucessivas etapas de inovação e modificação construíram as partes da boca [...] A riqueza dos novos dados da Evo-Devo pinta uma pintura viva de como as formas animais são feitas e evoluem.”<sup>92</sup>*

Dada a complexidade presente no processo evolutivo do natural, decorrente de um percurso de milhares de milhões de anos, o Caminho Oposto, à semelhança da investigação *Evo-Devo*, constitui um factor-chave para a compreensão dos processos morfo genéticos.

É certo que a forma tende a seguir a função e que por vezes possui mais do que uma função - tanto nos organismos como na arquitectura. Embora regidos por diferentes factores, existe um elo de ligação entre estes dois elementos capaz de traduzir uma melhor eficiência. Esta eficiência é benéfica para ambos os universos, possibilitando um gasto energético menor para os organismos, bem como uma construção mais eficaz para a arquitectura. A grande desigualdade difere no poder de escolha da arquitectura, uma vez que os organismos são formados segundo um processo de adaptação fisiológico e de sobrevivência definido pelos diferentes recursos biológicos à sua disposição.

Nesta conformidade, Otto sugere a adopção de uma arquitectura cíclica com um período de existência limitado, como qualquer ciclo presente nas diversas formas vivas. Restabelecer a relação harmoniosa e natural com o planeta deveria, segundo Frei Otto, constituir uma preocupação da arquitectura dos dias de hoje. Com este “sistema de poupança” é possível obter uma relação mais equilibrada entre o construído, os materiais utilizados e os gastos energéticos, face ao grande número de “lixo arquitectónico” existente na maior parte das cidades (onde, em muitos casos, ocupa e

---

<sup>91</sup> MUÑOZ-CHAPULI, Ramón - *Evo-Devo: Hacia un nuevo paradigma en Biología Evolutiva*. [trad. do a.].

<sup>92</sup> CARROL, Sean B. - *Endless Forms Most Beautiful: The New Science of Evo Devo and the Making of the Animal Kingdom*. p.10. [trad. do a.].



impossibilita o uso de espaços urbanos), tal como a perseverança de uma relação natural com a envolvente.

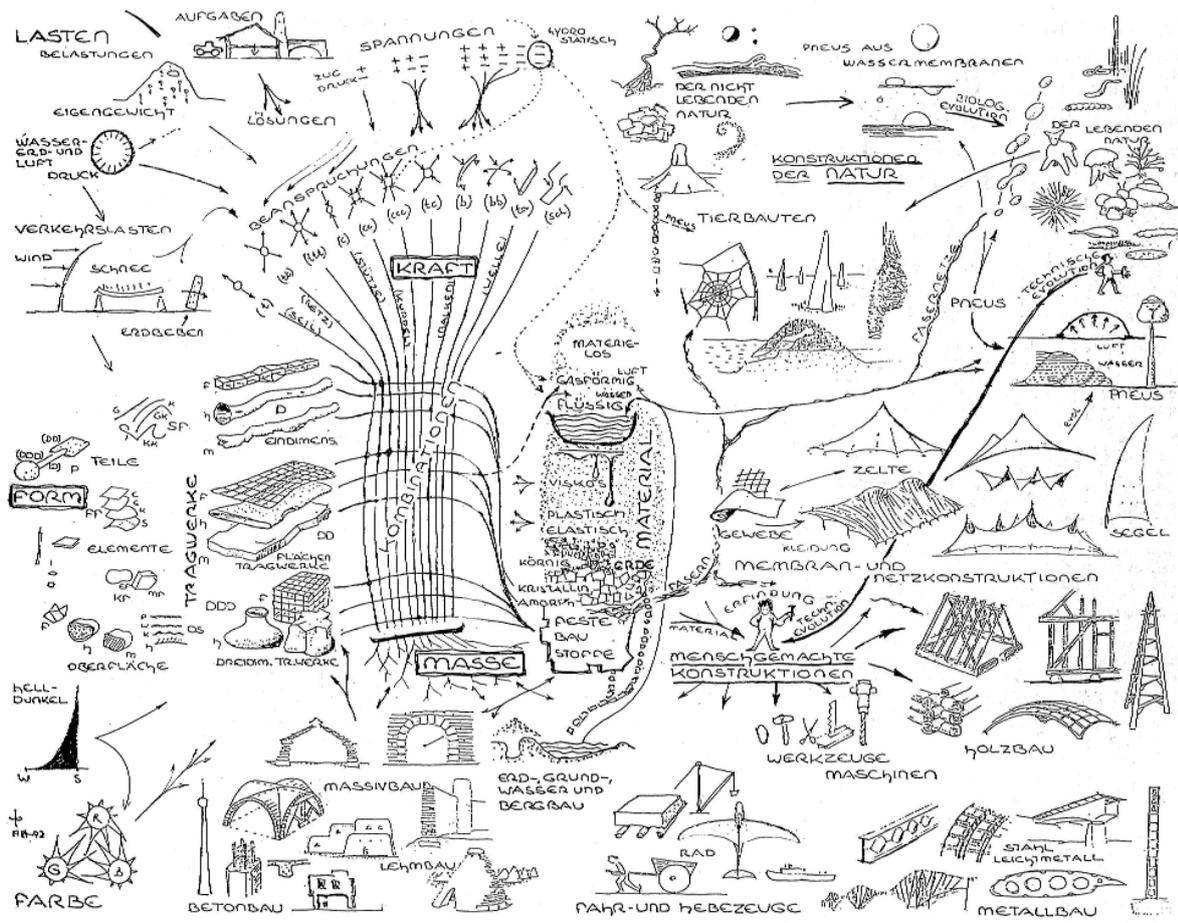
Embora utópico face ao modelo social que serve de exemplo para a maior parte das urbes humanas, o carácter “imortal” das infra-estruturas tem revelado fragilidades espaciais e ecológicas cada vez maiores, a que não podemos ficar indiferentes. A ligação entre o construído e o natural deve ser recuperada, pois a Humanidade avança contra o ciclo natural do nosso Planeta, pelo que novas medidas têm de ser adoptadas. Otto acredita que esta mudança poderá passar pela criação de infra-estruturas arquitectónicas de vida limitada, transformáveis, móveis, desmontáveis ou reutilizáveis, que serão apenas algumas das soluções possíveis para este tópico problemático. Esta visão ecológica será aprofundada neste capítulo.

Frei Otto expõe ainda vários modelos arquitectónicos sujeitos a diversas condicionantes, tal como acontece na Natureza. Realizou várias experiências na área das superfícies mínimas, sujeitando-as a diferentes condições periféricas. Deste estudo concluiu que o problema das superfícies mínimas é constituído por um sub-problema de optimização, pelo que deve ser resolvido matematicamente.<sup>93</sup> Os computadores podem resolver parte deste problema, embora Otto acredite que a maquete possua um papel fundamental neste campo. Através da maquete é possível atingir conclusões relevantes sobre a forma e a estrutura e em muito dos casos suficientemente precisas para comprovar a veracidade da estrutura em causa. Ao reproduzir uma forma (seja proveniente do universo natural ou da mente humana), se a reprodução do modelo for idêntica, quer a nível formal quer a nível material, a precisão da capacidade estrutural é extremamente próxima da real. Não obstante, não descarta a extensa bateria de testes rigorosos a que deve ser submetida.

*“Se, por exemplo, possuímos uma maquete da mesma forma e material e aplicarmos as cargas da mesma maneira, as suas deformações são lineares com respeito às reais. Esta é a condição fundamental.[...] os princípios fundamentais da experimentação com maquetas são conhecidos; por isso a questão de que se pode comprovar ou não está fora de dúvidas. Claro que se pode! Mas devemos? São cálculos*

---

<sup>93</sup> Cf. NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p.48.



↑ Fig.91 Sinopse gráfica da relação entre forma, força, massa, material e diferentes sistemas estruturais da Natureza. Frei Otto, IL 23.

*suficientemente seguros como para permitir que nos limitemos simplemente a calcular? Por um lado temos a física experimental e por outro a teórica.”<sup>95</sup>*

As observações realizadas por Frei Otto sugerem que na experimentação, na tecnologia ou na Natureza, existem várias soluções potencialmente igualitárias. Pela observação destas soluções será sempre possível aprendermos com a Natureza, desde que exista uma compreensão, interpretação e predicação desta. Para esse efeito, temos à nossa disposição ferramentas auxiliares, como a tecnologia humana, capazes de conduzir a uma melhor compreensão. No entanto este processo de transposição deverá ser realizado com domínio e precisão, uma vez que o uso de analogias biológicas poderá conduzir a conclusões erradas.

### 2.2.3. Forma, Força e Massa

*“A Natureza, tal como o Homem, realiza um processo eficaz, económico, funcional e de validez universal. No Universo não há nada que não seja «coerente» e «consequente», tal como não há nada que não seja apropriado para cumprir a sua finalidade da melhor forma possível e para contribuir à ordem e equilíbrio do «todo». [...] tudo tem um porquê e para quê e tudo está gerado sob um estrito critério de eficiência.”<sup>96</sup>*

Ao observarmos a optimização das construções biológicas apercebemo-nos da constante relação presente entre a forma, massa e energia. Através da construção do natural é possível ampliar o conhecimento necessário para uma melhor relação destas três componentes e, por consequência, ampliar o conhecimento da construção estrutural. Esta relação constitui o elemento-chave para o desenvolvimento de qualquer tipo de construção, seja ela biológica ou arquitectónica.

---

<sup>95</sup> SONGEL, Juan Maria - *Frei Otto. Conversación con Juan Maria Songel*. p.52. [trad. do a.].

<sup>96</sup> CERVERA, M. Rosa; PIOZ, Javier – *Las Formas en la naturaleza*. p.14-15. [trad. do a.].



*“Do ponto de vista físico, a melhor construção é aquela que utiliza o mínimo de energia e material; uma construção assim é, em certas ocasiões, especialmente bela.”*<sup>96</sup>

Em poucas palavras e de forma abstracta, esta citação é capaz de descrever o conceito base do princípio de construção ligeira. Este princípio foi um dos pontos mais relevantes e contínuos durante a sua pesquisa. Segundo Otto *“As formas de construção ligeira relativa são raramente coincidentes. Normalmente, estas são o resultado do desenvolvimento e optimização dos processos que, por alguma razão, seguem o princípio de redução da massa. Nós chamamos a este princípio o princípio de construção ligeira.”*<sup>97</sup> Este princípio encontra-se presente em variados resultados naturais e revela-se como elemento determinante na relação estrutural e formal das construções vivas. Citando novamente Otto, *“O princípio de construção ligeira é uma das fundações mais importantes para a evolução de objectos na natureza viva e na engenharia.”*<sup>98</sup> Torna-se claro o potencial implícito nas construções naturais e suas relações entre forma e estrutura, que constituíram ao longo da sua carreira um pilar fundamental.

O estudo da relação entre forma e estrutura dos seres vivos tem vindo a ser abordado ao longo dos séculos por diferentes estudiosos, sendo Galilei Galileu um dos primeiros neste campo de pesquisa. Galileu, durante as suas análises mecânicas, concluiu que o crescimento da forma é proporcional às suas necessidades estruturais, e em que a proporção é um elemento-chave para o sucesso estrutural.

D’Arcy Thompson segue os passos de Galileu e apercebeu-se de que na maior parte dos exemplos naturais, à medida que a forma aumenta, esta tende a perder a eficiência estrutural e a mobilidade locomotiva. No entanto, tal como na Arquitectura, esta afirmação não se aplica de forma linear. Existem exemplos em ambos os casos nos quais podemos constatar um aumento da eficácia estrutural ascendente, e em que o limite é levado ao extremo da capacidade estrutural do material em causa. Consequentemente, se existir um aumento da forma e volume, a estabilidade deverá aumentar proporcionalmente.

Ciente desta relação estrutural presente nas construções vivas, Frei Otto desenvolve vários mecanismos ao longo da sua investigação, capazes de avaliar e

---

<sup>96</sup> SONGEL, Juan Maria - *Frei Otto. Conversación con Juan Maria Songel*. p.11. [trad. do a.].

<sup>97</sup> Cf. NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p.39. [trad. do a.].

<sup>98</sup> Cf. NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p.40. [trad. do a.].



transpor esta relação para a arquitectura e engenharia. Desenvolveu mecanismos de medição destas variáveis, possibilitando avaliar a relação entre a resistência e a massa e comparou as diferentes tipologias construtivas realizadas com diferentes materiais. As diferentes composições materiais presentes no universo natural, criadas por diferentes processos e substâncias químicas heterogêneas, revelaram-se uma valiosa ferramenta, tanto para a Arquitectura como para Engenharia.

Estas técnicas de medição foram desenvolvidas inicialmente para o melhoramento das estruturas ligeiras; no entanto, o conhecimento adquirido pode ser aplicado a diferentes fins arquitectónicos, objectos e escalas, sejam estas a nível molecular ou astronómico. Estes mecanismos de medição permitiram comparar a capacidade mecânica dos órgãos dos organismos vivos com os produtos técnicos ou estruturas que são encontradas na natureza inerte.<sup>99</sup>

Uma das técnicas de medição criadas por Otto para o cálculo material do comprimento final de um elemento estrutural foi os diagramas Bic/ $\lambda$ .<sup>100</sup>

$$\text{Bic} = m / F \cdot s$$

$$\lambda = s / \sqrt{F}$$

O valor Bic representa a relação entre a massa (m) de uma construção para a sua habilidade de transferir a força (F) sobre a distância (s). Quanto menor for o valor, maior o princípio de construção ligeira e, por consequência, deduz-se uma maior optimização da forma. A esbeltez relativa ( $\lambda$ ) de um corpo descreve a relação entre a distância de carga transferida (s) para a força (F) sendo transferida.<sup>101</sup>

A formação de estruturas vivas é um processo que implica um gasto energético eficiente e uma longevidade limitada. As estruturas vivas são desenhadas para executar uma determinada função, durante um determinado ciclo, em que o gasto energético utilizado é gerido de forma eficiente. A Natureza, perita nesta gestão cíclica, revela

---

<sup>99</sup> NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p.50.

<sup>100</sup> Frei Otto não possuía um termo para descrever o valor de eficiência construtiva. Durante um jogo de Scrabble encontra, entre os vários resultados, o termo BIC. Este seria o termo escolhido, o qual associou ao seu professor de análise estrutural Hellmuth Bickenbach.

<sup>101</sup> *idem*.



como a arquitectura pode aprender a rentabilizar os recursos e requisitos ecológicos para uma arquitectura mais eficiente. Como já foi referido, Frei Otto acredita que esta gestão de recursos e eficiência deverá ser um tópico presente na boa prática arquitectónica.

Quando comparamos as propriedades ecológicas de uma estrutura viva, verificamos que a Biologia tem em consideração a relação entre a massa e a energia necessária durante a sua formação. Diferentes materiais responsáveis pela formação do tecido axial requerem não só diferentes quantidades de energia dispendida por unidade de massa, mas também diferentes proporções. Por exemplo, a quantidade de energia necessária durante o processo de formação da madeira - o tronco de uma árvore - é muito superior durante o seu ciclo de formação; uma vez formado, este ciclo estagna sem precisar de gerar novas células. Em contrapartida, o ciclo das células vivas responsáveis pela fotossíntese da planta, embora menor, necessita de ser constante.<sup>102</sup>

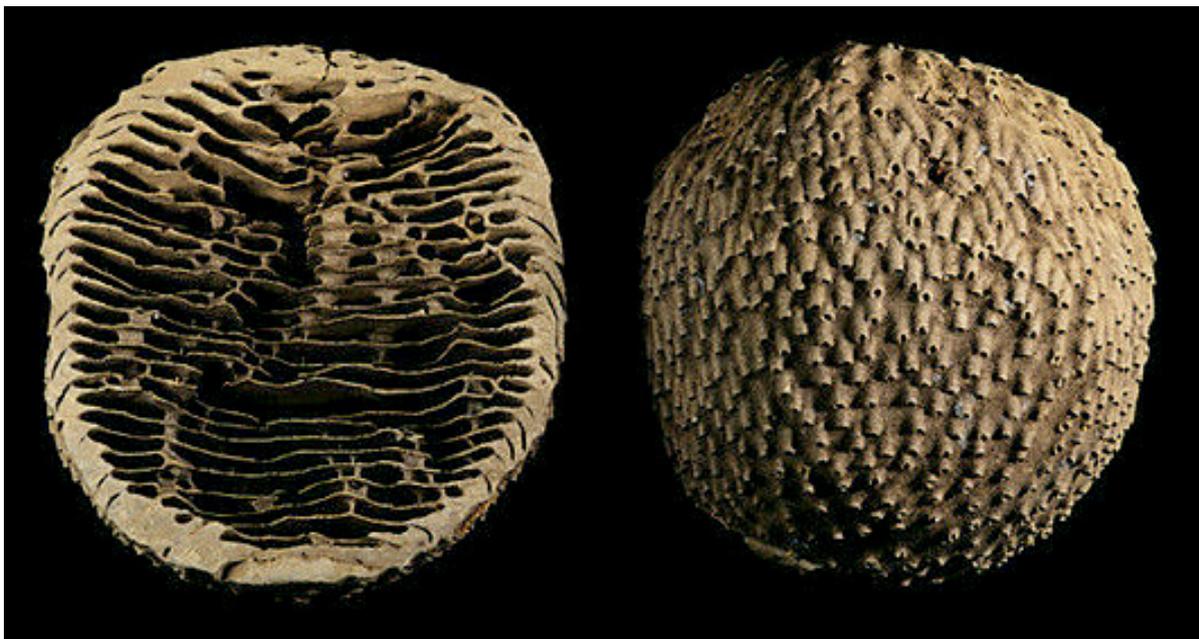
No entanto, a energia dispendida durante o processo de formação das estruturas vivas não é linear. Os factores externos como o clima ou os diversos ecossistemas actuam como condicionantes naturais e, mediante a presença destas variantes, influenciam a formação e quantidade de energia dispendida das estruturas em causa.

Como tal, as condições periféricas são um factor a ter em consideração, não só quando falamos de construções naturais, mas também na Arquitectura. Este factor decide sobre a quantidade e diversidade de recursos materiais, como as formas adquiridas para uma melhor “sobrevivência”, seja do universo natural ou do universo arquitectónico. Também poderá desviar as construções naturais dos seus princípios de construção ligeira, alterando-os em função da sua adaptação às necessidades primordiais.

Face a esta variante, Frei Otto salienta a importância das condições periféricas na Arquitectura, as quais influenciam directamente os princípios da forma e a sua relação com a massa. Através destas condições, a Arquitectura, tal como na Natureza, poderá afastar-se dos princípios da arquitectura ligeira, perdendo a eficácia energética necessária à sua construção. Esta variante não terá que constituir um aspecto negativo, apenas será mais um factor a ter em consideração, se procuramos realizar uma arquitectura eficiente.

---

<sup>102</sup> NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p.50.



↖ Fig.92 Tecnologia construtiva de uma teia de aranha.

↗ Fig.93 Malha hexagonal da colmeia de abelhas.

→ Fig.94 Ninho social dos pássaros Tecelões da sub família *Ploceinae*.

↓ Fig.95 Exterior e interior de uma colónia de termitas (*Reticulitermes lucifugus*).

A relação entre forma, energia e massa é um tópico presente em todas as construções vivas e artificiais. Quanto maior o equilíbrio entre estes três factores melhor será o processo de optimização da estrutura em causa. A Natureza revela-nos como foi capaz de produzir e aperfeiçoar esta relação ao longo da sua extensa e evolutiva existência, constituindo desta forma um valioso conhecimento para a Arquitectura e para a Engenharia.

#### 2.2.4. Tecnologia Animal

A tecnologia animal encontra-se claramente presente na obra de Frei Otto. É um assunto pelo qual Otto demonstrou grande interesse e procurou compreender, avaliar e aplicar às suas variadas e distintas técnicas construtivas. As suas eficácia e soluções simplistas revelam uma capacidade brilhante de inventar e, através dela, quer a tecnologia humana, quer os “objectos” construídos pelo Homem podem aprender e evoluir de forma positiva.

É necessário ter em conta que este tipo de construção não se encontra inserido na classe de formas dos seres vivos, no entanto é resultado das construções realizadas por estes organismos. A tecnologia construtiva natural revela como, através da evolução das espécies e da programação genética das formas vivas, é possível criar técnicas construtivas capazes de fornecer soluções necessárias para a sua sobrevivência.

A programação genética é, sem dúvida, um factor relevante na construção e formação da tecnologia animal. Ao observar as tecnologias naturais dos invertebrados conclui-se que existe uma predominância deste factor nos exemplos das teias e ângulos utilizados pelas aranhas, nas colmeias das abelhas ou nas colónias criadas pelas térmitas. Relativamente às estruturas criadas pelos animais vertebrados, esta programação não se encontra tão patente. Não obstante, a tecnologia animal é ainda utilizada para diferentes fins, de entre os quais, o abrigo, os mecanismos de caça, de produção e de reprodução ou as estruturas capazes de conferir ordem e funcionamento de uma colónia.

Frei Otto realiza, ao longo da sua obra, um estudo das técnicas construtivas dos animais invertebrados e vertebrados e constata que existe uma maior eficiência técnica



nas construções rígidas dos invertebrados, ao invés das estruturas apresentadas pelos vertebrados.

Seguindo esta conclusão e pela constatação da aparência similar à dos seus modelos, a sua atenção converge especialmente para as técnicas de construção de teias e ramos presentes na natureza viva. Para compreender o princípio ligeiro destas construções utiliza o já referido exercício Caminho Oposto e, com o auxílio do biólogo Ernst Kullmann, participante no grupo *Biologie und Bauen*, consegue observar os nós e os pontos de união microscopicamente. Assim, foi capaz de compreender e obter um precioso conhecimento acerca desta tecnologia construtiva que viria a constituir a base de todas as construções “Ottianas” em rede.

*“As redes podem ser descritas como sistemas ramificados. Sistemas tubulares ramificados construídos com pneus ocorrem frequentemente nos organismos vivos. Eles servem como sistemas de apoio - por exemplo, os sistemas vasculares dos animais, o sistema de brônquios e bronquíolos nos pulmões dos vertebrados, o sistema respiratório traqueal dos insectos o sistema vascular das plantas.”*<sup>103</sup>

Existe uma clara relação estrutural e morfológica das redes com as tecnologias animais, tais como os elementos constituintes dos organismos vivos. Outros tipos de tecnologia, neste caso humana, também poderão fornecer alguma informação nesta matéria. Se observarmos as construções milenares de sistemas de redes de caminhos realizados pelo Homem, planeados e não planeados, também poderemos apercebermos de como estes sistemas funcionam e agregam-se, criando uma rede estrutural.

A estruturação destes sistemas e formas biológicas é uma componente que Frei Otto têm vindo a estudar ao longo da sua obra. Contudo, quando falamos de elementos reguladores da organização espacial, as estruturas vivas revelam uma complexidade distinta das estruturas resultantes da tecnologia humana. Para decodificar e compreender a estruturação organizacional da Natureza viva, é necessário destacar o factor genético como elemento regulador e principal responsável pela estruturação das funções nos corpos biológicos.

---

<sup>103</sup> Cf. NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p.52. [trad. do a.].



A informação genética de que todos os organismos são portadores, em confrontação com o meio ambiente, tem sido “modelada” de harmonia com o processo de interação evolutivo dos organismos, influenciando desta forma as suas morfogéneses. Actualmente, é através da cartografia genética (mapas genéticos) que é possível determinar os genes reguladores da distribuição morfológica nos organismos. Este grupo (de genes), denominado *genes Hox*, são os responsáveis pelo o controlo do desenvolvimento embrionário da maioria dos animais.<sup>104</sup>

Por conseguinte, constatamos a importância da genética como factor decisivo tanto na regulação da morfogénese biológica, como na construção e formação de tecnologia animal. Através da programação genética, as estruturas vivas e técnicas de construção são reguladas por um conjunto de “parâmetros” herdados dos biliões de anos de evolução e da adaptação das espécies ao meio ambiente. Como tal, a programação genética não deve ser ignorada e uma melhor compreensão desta possibilitará uma melhor conversão análoga dos mecanismos construtivos e das viabilidades estruturais da Natureza, como é o caso das redes de Frei Otto.

No entanto, segundo as conclusões provenientes de Otto e das investigações biológicas, é possível pelo menos afirmar que “[...] *se a pressão e volume continua constante, o requerimento total de fibras absorção-força mantêm o mesmo valor para todas as formas tridimensionais construídas em rede. Por outras palavras, a mudança de formas não necessita de energia extra, apenas é necessário reorientar as direcção das fibras.*”<sup>105</sup>

Este princípio revela a capacidade, eficácia e facilidade estrutural que esta tecnologia construtiva possui ao adaptar-se às variadas formas. Ao nível do natural seguem os princípios de auto-organização da Natureza, influenciados directamente pela carga genética que carregam e formando inúmeras e potencias soluções de grande interesse para a Arquitectura. Através delas podemos constatar e ampliar o número de

---

<sup>104</sup> Os *genes Hox* ou *genes homeóticos* são um subconjunto da família *homeobox*. Estes genes actuam no controle maestro do desenvolvimento de vários organismos multicelulares, sendo um dos principais responsáveis pela morfogénese e diferenciação celular durante o seu desenvolvimento. Foram descobertos graças às primeiras observações do biólogo inglês Willian de mutantes espontâneos da mosca da fruta *Drosophila melanogaster* e, mais tarde, comprovados com os estudos genéticos de Edward Lewis do Instituto de Tecnologia da Califórnia, da Christiana Nüsslein-Vollhard e do Eric Wieschaus na Alemanha. Embora este grupo de genes esteja presente na maioria dos animais, as moscas e vermes possuem um conjunto *Hox* de apenas 8 genes, ao contrário dos peixes e mamíferos, que possuem 4 conjuntos, sendo cada conjunto similar ao conjunto das moscas e vermes. Esta similaridade serviu para perceber que o desenvolvimento embrionário destes seres, numa fase inicial, é praticamente idêntico.

<sup>105</sup> Cf. NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p.52. [trad. do a.].



↑ Fig.96 Proposta de Frei Otto para uma casa encrostada numa colina.  
↓ Fig.97 Casa árvore por Frei Otto.

formas, formações e técnicas capazes de resolver várias componentes da boa prática arquitectónica, tais como a relação entre forma, estrutura e volume.

### 2.2.5. Arquitectura Ecológica

Os estudos e observações reunidas por Frei Otto influenciaram decisivamente o seu pensamento e a prática da Arquitectura direccionada aos princípios da ecologia. A eficiência energética formal, estrutural e material presente nos modelos naturais foram factores cruciais incapazes de serem ignorados, pelo que “forçaram” a reconsiderar as finalidades da Arquitectura a diferentes níveis. Destas finalidades surge a problemática e fracassada relação ecológica com o meio, presente em vários exemplos contemporâneos.

A preocupação ecológica de Otto nasce da oposição aos modelos e objectivos dispensáveis que esta Arquitectura tem praticado, em parte devido à necessidade implícita de traduzir novas formas e resultados adequados à ideia progressista, tecnológica e consumista, do modelo social actual.

O crescimento demográfico e o modo como se tem expandido no território, constituem também variantes a que devem ser dadas novas soluções, a fim de se restabelecer um equilíbrio demográfico contrariado pelos modelos urbanos actuais caracterizados por um crescimento desenfreado.

*“Todas as semanas 1.3 milhão de pessoas novas – 70 milhões por ano – chegam às cidades. A população mundial supera os 50 por cento nos centros urbanos (era 14 por cento em 1900). O crescimento das cidades levou as tendências demográficas exactamente ao contrário do que muitos especialistas previram. Poucos especialistas previam o efeito dominante que a urbanização teria. Demograficamente, os próximos 50 anos podem ser os mais violentos da história humana. Um grande número de pessoas estão fazendo grandes mudanças.”<sup>106</sup>*

---

<sup>106</sup> BRAND, Stewart — *Environmental Heresies*.7:2. [trad. do a.].



No entanto, a compacidade urbana não é necessariamente negativa. Graças aos resultados obtidos nos recentes estudos ecológicos das grandes urbes, a compacidade urbana tem sido aceite progressivamente pelos ambientalistas. Actualmente, do ponto de vista ecológico, as grandes cidades, possuem uma pegada ecológica e um consumo energético *per capita* inferior aos pequenos aglomerados rurais.<sup>107</sup> Não obstante, a suburbanização resultante das necessidades expansivas das grandes urbes, tem contrariado este equilíbrio ecológico. Estas áreas de menor densidade demográfica têm ocupado grande parte do território suburbano, implicando maiores gastos de recursos, de energia e de infra-estruturas.

Face a esta problemática, as *slums* (favelas), embora possuidoras de grandes problemas (sociais, saúde, sanitários, económicos e urbanos), representam um gasto energético, material e territorial muito menor do que as áreas “ricas” suburbanas, pelo que merecem o devido estudo.

Segundo Stewart Brand<sup>108</sup> *“Aos olhos do planeador, estas cidades parecem caóticas. Aos meus olhos treinados como biólogo, elas parecem orgânicas.[...] As cidades clandestinas são também inesperadamente verdes. Têm o máximo de densidade- 1 milhão de pessoas por milha quadrada em algumas áreas de Mumbai- e têm um uso energético e material mínimo. As pessoas circulam a pé, de bicicleta, de riquexó ou pela universal partilha de táxi.”*<sup>109</sup>

O problema ecológico das cidades actuais reside na presente instabilidade populacional, na poluição citadina, na falta de ordem, de infra-estruturas e de planificação, sendo na maioria dos casos, o resultado de um sistema excessivo de “causa-efeito”. Nesta matéria, a arquitectura presente nos modelos urbanos também tem contribuído para o desequilíbrio ecológico do planeta, pelo que deveremos questionar o rumo da arquitectura moderna.<sup>110</sup>

---

<sup>107</sup> BRAND, Stewart - *How slums can save the planet*.

<sup>108</sup> Stewart Brand (1939 - ) é um ambientalista mundialmente conceituado e biólogo graduado na Universidade de Stanford, Califórnia, que tem dedicado grande parte da sua carreira ao estudo do impacto ambiental causado pelo crescimento urbano e demográfico. É o autor da conhecida obra *Whole Earth Catalog*.

<sup>109</sup> BRAND, Stewart - *How slums can save the planet*. [trad. do a.].

<sup>110</sup> *“Os edifícios representam um investimento enorme, não só de dinheiro e tempo, mas também dos recursos mundiais. Na construção e ocupação de edifícios, consumimos vastas quantidades de materiais e geram a maior porção mundial de poluição ambiental. De acordo com o Worldwatch Institute, os edifícios consomem por ano mais de 40 por cento da energia utilizada no mundo e, ao fazê-lo, libertam um terço do dióxido de carbono para a atmosfera e dois quintos dos componentes que causam as chuvas ácidas.”* In. ALLEN, Edward - *How Buildings Work: The Natural Order of Architecture*. Prólogo. [trad. do a.].



Frei Otto, atento a esta problemática ecológica, defende uma arquitectura adaptável, reciclada, eficiente, em que apenas existe espaço para o essencial. Ao contrário da arquitectura modernista formulada em 1896 por Louis Sullivan - a arquitectura em que a *“form follows function”*- Otto simpatiza com o acto *reductio* de Mies Van der Rohe *“Less is more”*.

*“«Less is more» é algo que aprendi na sua essência, originalmente e autenticamente, não apenas da forma que é compreendido nos E.U.A., i.e. nos termos da forma estilística. Como arquitecto teria de subscrever de qualquer forma para a ideia de redução. «Less is more»- esta frase fascina-me: construir menos com menos material, menos betão e, usando menos energia; construir utilizando os recursos disponíveis: terra, água, ar. Hoje, os meus objectivos são os mesmo que eram antes: construir em proximidade com a natureza e fazer um grande feito com menos; observar criticamente e conscientemente mesmo na fase de desenho. É melhor construir nada do que construir demasiado!”*.<sup>111</sup>

Otto acredita que este acto redutor é um factor determinante para a boa prática arquitectónica e, por conseguinte, para a boa prática ecológica, que não passa por pequenos apontamentos presentes no projecto (como uma cobertura verde, ou uma fachada com “jardins verticais”), mas por criar soluções capazes de reduzir os gastos energético, material e temporal de um projecto.

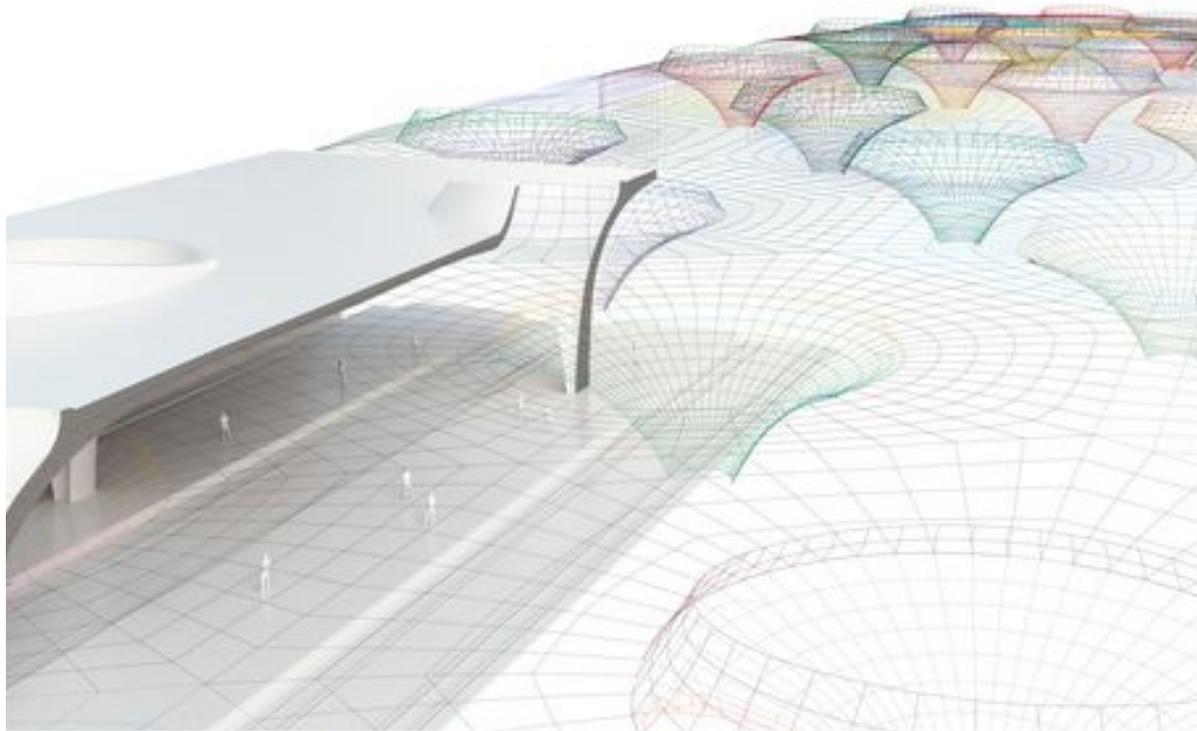
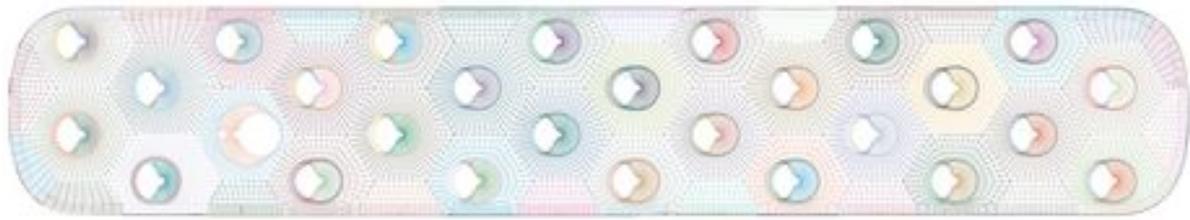
*“Tal como odeio edifícios, estou satisfeito quando através da ligeireza extrema, consigo aliviar o estrago que eles têm feito.”*<sup>112</sup>

Logo, é possível combater a exploração exponencial da Natureza, o consumo energético e de matérias provocado pelo crescimento drástico populacional, através de uma gestão mais regrada destes recursos. Se observarmos os organismos vivos, verificamos que não revelam propriamente soluções ecológicas, mas os princípios presentes na sua construção ligeira constituem uma componente que poderá revelar

---

<sup>111</sup> Cf. NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p.57. [trad. do a.].

<sup>112</sup> *idem*.



↑ Fig.98 Planta de cobertura da estação Stuttgart 21. Projecto de Frei Otto e *Ingehoven Architects*.  
→ Fig.99 Axonometria do interior e exterior da estação.  
↓ Fig.100 Maquete do interior da estação.

princípios capazes de reduzir estes gastos e, por sua vez, aumentar a eficiência desta relação.

A capacidade adaptativa e mutável presente nos organismos vivos é algo que a arquitectura actual deveria adaptar. Otto defende assim a utilização de uma arquitectura inteligente, ou seja, uma arquitectura adaptável, móvel, mutável, ligeira, racional nos recursos energéticos e materiais utilizados. Otto salienta que estes requisitos podem ser diminuídos, ao serem analisados e reconsiderados através não só da sua reflexão, como também do cálculo do projecto durante a sua fase de desenho.<sup>113</sup>

O projecto *Stuttgart 21* de Frei Otto em colaboração com os *Ingehoven Architects* é realizado segundo este princípio de arquitectura inteligente. A estação soterrada de comboios possui um sistema ligeiro estrutural, que revela esta preocupação de eficiência energética e de material. Outro exercício que deriva da procurada inteligência arquitectónica e sua variabilidade revela-se no desenvolvimento de várias tipologias de tendas. Estas construções milenares possuem o princípio da construção ligeira, em que a relação energética, material, e também de adaptabilidade e mobilidade são facilmente atingidas.

Segundo Otto, não só será necessário reduzir o impacto ambiental que os edifícios, cidades e mega-cidades provocam, mas também restabelecer a ligação ao mundo natural dos seus utilizadores. Nestes modelos existe uma relação simbiótica confusa com o natural por parte de quem a habita. Temos de ter em conta que nós, seres humanos, não somos os únicos utilizadores, porquanto também a fauna e os flora estão inseridos neste habitat. Mais relevante ainda é a negação das nossas origens biológicas, dos modelos e do modo em que habitamos. O Homem, como ser vivo, está claramente ligado ao espaço natural, que cada vez mais sofre com o processo artificial construído pelos modelos habitacionais. Contrariando este processo artificial, Frei Otto salienta que devemos recuperar as nossas origens biológicas e criar construções capazes de proporcionar harmonia natural ao nosso habitat e à nossa natureza envolvente.

---

<sup>113</sup> Cf. NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p.52.



### 2.3. Centros de investigação de Frei Otto

Como já foi referido, grande parte do trabalho de Frei Otto teve origem nas várias investigações em que participou. Estas tiveram um papel determinante na obra do arquitecto alemão, fazendo-se sentir até aos dias de hoje. Foram realizadas em diferentes períodos e locais, mas essencialmente em território alemão, tornando-se uma valiosa fonte de informação. Das diversas vertentes da sua investigação e de acordo com o estudo desta dissertação, deverão destacar-se os seguintes grupos de investigação de que Frei Otto foi responsável:

Grupo de investigação Biologia e Construção (*Biologie und Bauen*).

Instituto de Estruturas Ligeiras, IL (*Institut für leichte Flächentragwerke*).

Programa de investigação de Estruturas Naturais SBF230. (*Natürlich Konstruktionen*).

#### 2.3.1. Grupo de investigação Biologia e Construção - *Biologie und Bauen*

O grupo *Biologie und Bauen* é fundado em 1961, resultado de um seminário de Frei Otto na Universidade Técnica de Berlim. Este seminário tinha como temática principal as estruturas da natureza e suas técnicas “construtivas”. Juntamente com o biólogo Johann Gerhard Helmcke, professor desta Universidade, que investigava os processos físicos-técnicos da formação de estruturas da natureza, surge a oportunidade de unir duas áreas tão distintas como a Arquitectura e a Biologia. Esta formação de carácter multidisciplinar revela, por um lado, a importância que Frei Otto concedeu à investigação na Arquitectura e, por outro, a necessidade de salvaguardar a divisão artificial entre as artes e ciências.<sup>114</sup>

---

<sup>114</sup> GONZÁLEZ, Juan - *Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart: una experiencia de metodología, investigación y sistematización en la búsqueda de la forma resistente*. p.110.



O grupo é formado essencialmente por arquitectos, engenheiros e biólogos que revelaram os princípios da construção ligeira da natureza, reunindo os conhecimentos da Ciência e Arte, e permitindo assim quebrar a autonomia sentida na disciplina arquitectónica.

Citando Frei Otto: *“O grupo de trabalho alemão «Biologie und Bauen» ocupa um lugar singular no panorama internacional da investigação. Neste grupo colaboram importantes biólogos, arquitectos e engenheiros [...] O grupo foi fundado em 1961 com o objectivo de alcançar uma melhor compreensão recíproca entre biologia, técnica e arquitectura. Os métodos científicos até à data adoptados eram unilaterais e insuficientes, limitando-se a analogias banais. Anteriormente era comum afirmar-se que os modelos da natureza tinham inspirado os arquitectos do passado. O grupo demonstrou que até agora a técnica tem sido, na sua maior parte, antagonista à natureza: temendo as forças naturais, o homem procurou proteger-se com construções, com a arquitectura. Defendeu-se com tanta violência que parte da natureza ficou destruída.”*<sup>115</sup>

É de salientar, no que respeita à construção ligeira, que todos os tipos de construções deverão ser alvo de estudo e aceites como possíveis soluções. Deste modo, todas as fontes de inspiração, sejam estas de natureza inanimada ou animada, deverão ser tomadas em consideração. Para tal, é necessário dominar e compreender as leis universais da génese terrestre, o que implica a reunião de diversos conhecimentos científicos. Assim, em 1964, novos membros de diversas áreas completariam o elenco com novas ciências, tais como a Paleontologia, Zoologia, Biofísica e Etologia (Seilacher e Tübingen, Kullmann e Schäffer, Nachtingall, Eibl-Eibesfeld e Schiefenhövel, respectivamente).

Conceitos como os de formação, crescimento e existência dos objectos da natureza viva fazem parte da investigação deste grupo. No entanto, a visão comum de uma natureza perfeita é posta em causa, pois esta investigação constata que nem sempre se manifesta como tal. O grupo alemão constatou que existe uma meia verdade presente na visão de todos os objectos naturais serem perfeitos, acreditando que esta estratégia tem vindo a revelar os seus estragos. A tendência para considerar a Natureza

---

<sup>115</sup> Cf. GONZÁLEZ, Juan - *Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart: una experiencia de metodología, investigación y sistematización en la búsqueda de la forma resistente*. p.111. [trad. do a.].



como ferramenta ou resposta aos problemas (neste caso da Arquitectura) poderá ser por vezes inviável conduzindo-nos numa direcção errada. Ou seja, os diversos investigadores constataram a presença de uma grande complexidade nas construções vivas, como resultado da sua adaptação evolutiva através dos complexos processos de interacção com o meio, mutação e selecção ao longo de milhões de anos. A mimésis, por vezes inalcançável, passa a ser substituída por uma nova interpretação dos processos biológicos, recorrendo ao uso de diversas analogias de distintas aproximações à Biologia.

Apesar da distância entre a perfeição dos sistemas naturais e os modelos arquitectónicos, verificou-se que, em alguns dos resultados mais recentes do grupo, nomeadamente nas estruturas ligeiras, possuíam uma enorme semelhança entre elas. Mesmo sem o uso de nenhuma analogia biológica, alguns dos resultados estavam próximos das construções naturais. É o caso das cúpulas do americano Buckminster Fuller, em que se constataram, através do avanço tecnológico, as incríveis semelhanças entre as suas cúpulas e o esqueleto das diatomáceas ampliadas de cinco a cinquenta mil vezes. Também é o exemplo das tendas da *Exposição Suíça* de Lausane de 1963, do *Pavilhão de Montreal* e da cobertura Olímpica de Munique, as quais podem ser entendidas como réplicas de teias de aranha.<sup>116</sup> Embora hoje já tenham sido estudadas, calculadas e ensaiadas, através do uso de estruturas com redes de cabos metálicos, o seu conhecimento neste período era limitado.

Esta observação permitiu ao grupo definir uma nova regra: *“Se conhecemos aprofundadamente a técnica e condições básicas dos princípios das construções ligeiras, só depois é que podemos começar a compreender os objectos da natureza viva no que diz respeito à forma e estrutura [...]. Se quisermos copia-las, em maior parte dos casos os seus custos seriam elevadíssimos. A natureza otimiza segundo critérios de rendimento com o mínimo uso de material.”*<sup>117</sup>

Com o desenlace da investigação e conclusões deste grupo, os investigadores começaram a compreender a relação entre massa e forma, a qual varia segundo um

---

<sup>116</sup> GONZÁLEZ, Juan - *Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart: una experiencia de metodología, investigacion y sistematización en la búsqueda de la forma resistente*. p.114.

<sup>117</sup> Cf. GONZÁLEZ, Juan - *Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart: una experiencia de metodología, investigacion y sistematización en la búsqueda de la forma resistente*. p.116. [trad. do a.].



modelo de escalas distintas. Apercebem-se de que grandes “construções” naturais, sejam estas animadas ou inanimadas, normalmente possuem elementos estruturais ligeiros. Só assim é possível responder a uma grande escala, mantendo as suas propriedades estruturais.

Esta relação tem sido maioritariamente desproporcional, se compararmos as criações humanas com as naturais. Em grande parte dos casos, a quantidade de massa utilizada na tecnologia humana supera a da tecnologia natural, e somente nos últimos trinta anos é que surgiram novos materiais, especificamente no universo das fibras, em que a resistência é maior, proporcionalmente à escala.

O estudo da relação entre forma e massa nos objectos naturais análogos deverá focar-se num elemento comum a todos os sistemas vivos. Este elemento regulador e estruturador de todas as formas vivas chama-se célula. A célula surge como um elemento comum a todos, capaz de, em determinados contextos e condições naturais, ser a “técnica de construção” adequada para todos os seres vivos, quer no reino animal e vegetal, quer nos microrganismos.

Constituída por um núcleo fluído no interior e uma membrana exterior flexível e resistente à tracção, torna-se num simples mas eficaz “sistema construtivo”, capaz de oferecer resultados tão distintos perante as mesmas leis construtivas. Este sistema poderá ter interesse especial para a Arquitectura, pois através de um acto minimalista seria possível construir diferentes resultados arquitectónicos. Talvez o elemento construtivo mais próximo da célula seja o tijolo, com o qual conseguem-se criar diferentes resultados; no entanto este material ainda está longe de conseguir a eficácia que a célula possui, na medida em que ainda depende de elementos estruturais para a construção de um objecto arquitectónico.

O grupo procuraria investigar nos próximos anos todos os elementos naturais possuidores de uma leveza peculiar com estruturas de massa reduzida e um escasso gasto energético. Estes estudos feitos pelo grupo *Biologie und Bauen* ofereceram um grande contributo para a Arquitectura e a Engenharia, possibilitando uma maior compreensão das estruturas vivas. Estas analogias biológicas permitiram uma melhor compreensão entre a forma e a massa, oferecendo a possibilidade de construir de harmonia com técnicas de maior leveza estrutural e também com um custo mais reduzido. Novas formas e técnicas surgiram desta investigação, ampliando o conjunto



de soluções arquitectónicas à disposição do arquitecto. Por outro lado, e embora pouco utilizadas, permitiram uma melhor compreensão da relação entre a Arquitectura e a Natureza, possibilitando uma construção capaz de conviver harmoniosamente com a Natureza, tal como os organismos vivos e o planeta.

### 2.3.2. Instituto de Estruturas Ligeiras, IL - *Institut für leichte Flächentragwerke*

O grupo seria fundado por Frei Otto em 1964, mais uma vez na Universidade de Stuttgart. Esta oportunidade surge na carreira de Otto por intermédio do reitor da Universidade Fritz Leonhardt, que oferece novas e melhores condições para dar continuidade ao sucesso da sua investigação. A sua participação marcou um momento de viragem, originando a *Fakultät für Bauwesen* (Faculdade de Construção), que reunia engenheiros, arquitectos e urbanistas. Esta Faculdade tornou-se o centro de investigação, discussão e concretização de novas ideias. Inicialmente dirigida por uma equipa reduzida de apenas algumas pessoas e, com o desenrolar do projecto e também com ajuda de apoios externos governamentais (graças aos programas paralelos de investigação SFB 64 e 230), o programa ganharia uma nova dimensão.

Embora o programa de investigação fosse recente, a sua origem não parte do zero. O IL surge na continuação dos trabalhos desenvolvidos por Frei Otto, no projecto fundado pelo próprio, *Entwicklungsstätte für den Leichtbau* em Berlim. O início do programa começa no verão de 1964, através de um seminário em que os princípios da contrição ligeira e relações recíprocas entre forma, força e massa são discutidos. Os estudos desenvolvidos pelo IL teriam origem nos trabalhos livres desenvolvidos por docentes, estudantes e bolsiros de investigação, abrindo o horizonte a novas soluções arquitectónicas.

É de frisar que os resultados alcançados por este programa tiveram uma componente experimental muito presente, em que técnicas inovadoras foram cruciais e responsáveis pelas futuras conclusões. Inúmeras técnicas, mecanismos e artefactos foram utilizados nesta investigação, sendo de destacar uma técnica inovadora de fotografia, um mecanismo de superfícies mínimas, um túnel de vento, uma mesa de medições ou mecanismos de medição de forças e deformações, além de outros.



Entre 1965 e 1972 o grupo seria solicitado para dois projectos (o *Pavilhão alemão da Exposição Mundial de Montreal* e a *Sede permanente* do Instituto IL) pelo que teve de interromper as suas actividades. Só a partir de 1972 é que o grupo retomaria a investigação proposta pelo respectivo programa de investigação. Durante o período de investigação vários modelos e soluções do universo natural foram alvo de um estudo minucioso. O resultado seria publicado mais tarde num conjunto de volumes denominados de *Mitteilungen des IL*. De entre as várias publicações faziam parte os estudos sobre as diatomáceas (IL 28), os radiolários (IL 33/38), as películas de sabão (IL 18), as construções em bambu (IL 31) as classificações de formas e estruturas (IL 22/23), as estruturas pneumáticas, as estruturas ósseas (IL 35) além de outras.<sup>118</sup> Os resultados, técnicas e experiências destas últimas publicações, em conformidade com o pretensiosismo desta dissertação, serão devidamente identificados e analisados no capítulo 2.4.

### 2.3.3. Programa de investigação de Estruturas Naturais SBF230 - *Natürlich Konstruktionen*

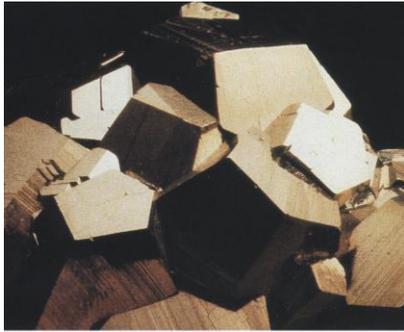
No início dos anos 80, Frei Otto, juntamente com o Instituto de Estruturas Ligeiras e o grupo anterior referido *Biologie und Bauen*, começa a planear um novo programa, virado novamente para a Biologia e Construção, em que Natureza e técnica reuniam-se novamente para uma nova e melhor prática arquitectónica. O grupo denominou-se SFB 230 - *Natürliche Konstruktionen*.

Este programa de investigação, tal como o anterior, surge com o apoio do governo alemão, inserindo-se nos estudos prévios de Frei Otto e de programas de investigação do Instituto alemão, oferecendo assim uma continuidade às experiências e interesses revelados pelo arquitecto alemão nos últimos anos.

O SFB 230 teve início em Julho de 1984 e terminou oficialmente em Dezembro de 1995. Foi realizado entre as Universidades de Stuttgart e Tübingen, juntamente com a

---

<sup>118</sup> Consultar anexos em que são descritas todas as publicações *Mitteilungen des IL*.



↖ Fig.101 Cristalização resultante das forças moleculares.

↑ Fig.102 Planeta Terra-Esfera líquida.

↗ Fig.103 Efeito-cogumelo causado pela erupção do vulcão Sarychev.

→ Fig.104 Processo emergente causado pelo arrefecimento drástico do basalto. Calçada dos Gigantes. Antrin, Irlanda do N.

↓ Fig.105 Formação rochosa do deserto de Monegros, Espanha.

participação de um total de quinze institutos.<sup>119</sup> O foco principal revelou-se no estudo de estruturas naturais provenientes dos processos naturais de autoformação e auto-organização. Aprofundando os tópicos anteriores, o projecto SFB 230 focou-se nos processos de autoformação e auto-organização de todas as áreas da natureza inerte e viva, e na sua técnica, na qual também se incluiu a edificação e processos de urbanização. A auto-optimização e processos de busca e autogeração da forma na técnica e na arte também foram alvos de investigação. Os mecanismos de comportamento animal e humano relacionados com a casa e cidade, o ensaio de renovação do entendimento da Natureza e a estética das estruturas naturais e técnicas foram outros pontos inerentes à investigação do grupo.

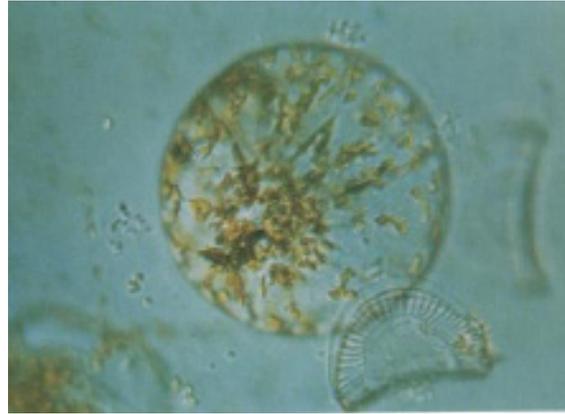
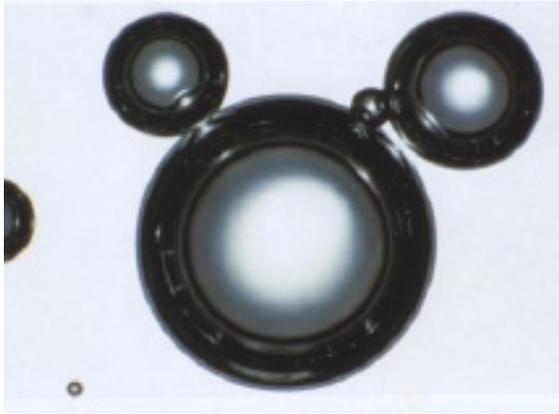
Este grupo fragmentou-se em vários projectos e áreas, consoante as universidades, institutos e investigadores que fizeram parte deste programa de investigação. A sua estrutura dividiu-se em diferentes tópicos relevantes à investigação, tais como a evolução das estruturas, a morfologia estrutural de sistemas portantes vegetais, dos esqueletos animais e biomecânica dos invertebrados, e também das estruturas vegetais de transporte por água, além de muitos outros.

Os resultados seriam publicados em vários números, constituindo uma extensa publicação. A primeira série é formada por 50 volumes denominada de *Konzepte des SBF 230*, a qual ficou (por falta de um conhecimento mais aprofundado) à disposição interna do programa.

Estes grupos interdisciplinares foram capazes de reunir arquitectos, engenheiros, urbanistas, geodestas, biólogos, paleontólogos, filósofos, historiadores, físicos e sinérgicos, que através de um extenso e aprofundado estudo da natureza, da observação e tradução das técnicas, formas e eficácia da natureza, vieram a constituir três dos grupos mais relevantes deste período, concernente à Arquitectura e à Biónica.

---

<sup>119</sup> GONZÁLEZ, Juan - *Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart: una experiencia de metodología, investigación y sistematización en la búsqueda de la forma resistente*. p.139.



- ⌘ Fig.106 Micro-esfera - Embora seja uma célula inanimada, representa um elemento constructivo da vida.
- ⌘ Fig.107 Célula - Em termos constructivos, são "balões" fibrosos preenchidos com líquido.
- ⌘ Fig.108 Esferas pneumáticas naturais - bagas de mirtilo.
- ⌘ Fig.109 "Construção" pneumática do embrião humano.

## 2.4. Construções e técnicas de busca da forma de Frei Otto e do Instituto IL

*“Todos os objectos materiais na natureza e tecnologia têm a sua forma e quando utilizados em conjunto, tornam-se construções. Objectos naturais são construções naturais. A sua existência resulta do processo de auto-formação, permitindo ao Homem simular os processos naturais mas também criar objectos artificiais.”*<sup>120</sup>

Estes processos de formação à disposição dos arquitectos permitem utilizar a Natureza como elemento criador de formas fundamentais, segundo um conjunto de regras, formas e proporções capazes de ajudar a construção de modelos arquitectónicos. Para Frei Otto *“Construção significa unir os elementos, construí-los. Todos os objectos materiais são construções, constituídos por partes e elementos. Esta é a verdade de todo o cosmos, dos objectos naturais e materiais feitos pelo Homem.”*<sup>121</sup>

As técnicas de busca da forma (*form-finding techniques* como denomina o arquitecto alemão) foi um estudo contínuo e presente ao longa da obra de Frei Otto. A compreensão da natureza viva/inanimada e a sua aplicação à Arquitectura revelou-se numa longa pesquisa, rica em experiências, técnicas e resultados, os quais reflectiram um estilo inigualável que tanto caracteriza a sua obra. O seu interesse surge especialmente nos processos naturais de auto-formação das formas e seu comportamento estrutural. Otto torna-se, assim, à semelhança de Antoni Gaudí, Félix Candela ou Bruno Zevi, um dos pioneiros a desenvolver um estudo e descoberta de novas formas físicas aplicáveis à Arquitectura. No seu trabalho, a busca da forma é uma ferramenta de desenho baseada em processos empíricos, que utilizam a auto-organização de sistemas materiais sob a influência de forças extrínsecas.<sup>122</sup>

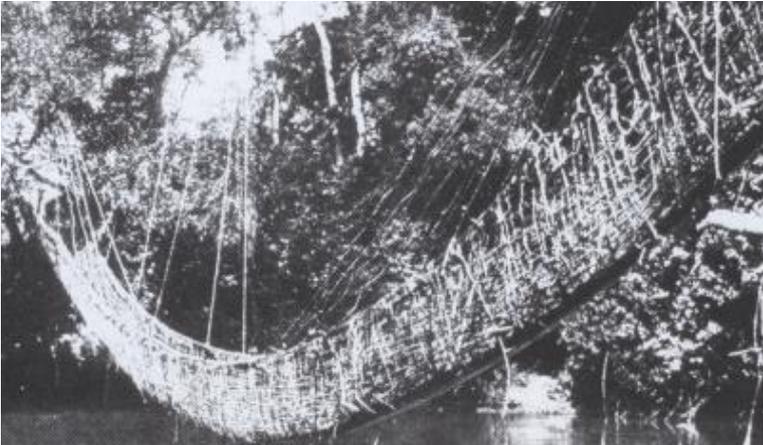
*“[...] sobre a geração de formas a partir de processos físicos, uma série de processos físicos e cálculos a partir dos quais geram formas que já estão optimizadas desde o princípio ou, que podem optimizar-se mediante pequenos passos seguindo um processo interactivo. Ocupei-me sobretudo de aqueles processos que, desde o princípio contêm*

---

<sup>120</sup> OTTO, Frei; RASCH, Bodo - *Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal*. p.23. [trad. do a.].

<sup>121</sup> OTTO, Frei; RASCH, Bodo - *Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal*. p.15. [trad. do a.].

<sup>122</sup> “AD : Architectural Design”. London : Wiley Academy. 2004, 74:3. p.20.



↑ Fig.110 Exemplo de ocupação territorial pelo Homem, numa cidade medieval.

↖ Fig.111 Construção em argila - forma clássica das abóbadas.

↙ Fig.112 Ponte suspensa - Processo de auto-formação criado pelo Homem.

↓ Fig.113 Rede de pesca. Como as tendas, este exemplo atinge a sua forma através do processo de auto-formação.

*uma optimização, tal como as bolhas de sabão, as superfícies mínimas e as formas de fluidos que ao serem extremamente sensíveis, só podem existir de muito poucas formas, a partir das quais têm-nos revelado um universo de infinitas possibilidades. As membranas de sabão possuem infinitas formas.”* <sup>123</sup>

Tal como na Biónica, Frei Otto estudou vários processos de formação da forma. Segundo a sua pesquisa *Finding Form* (Prémio Werkbund), Otto divide os processos de formação em quatro universos:

- Natureza inanimada;
- Natureza animada;
- Tecnologia animal e humana;
- Arte.

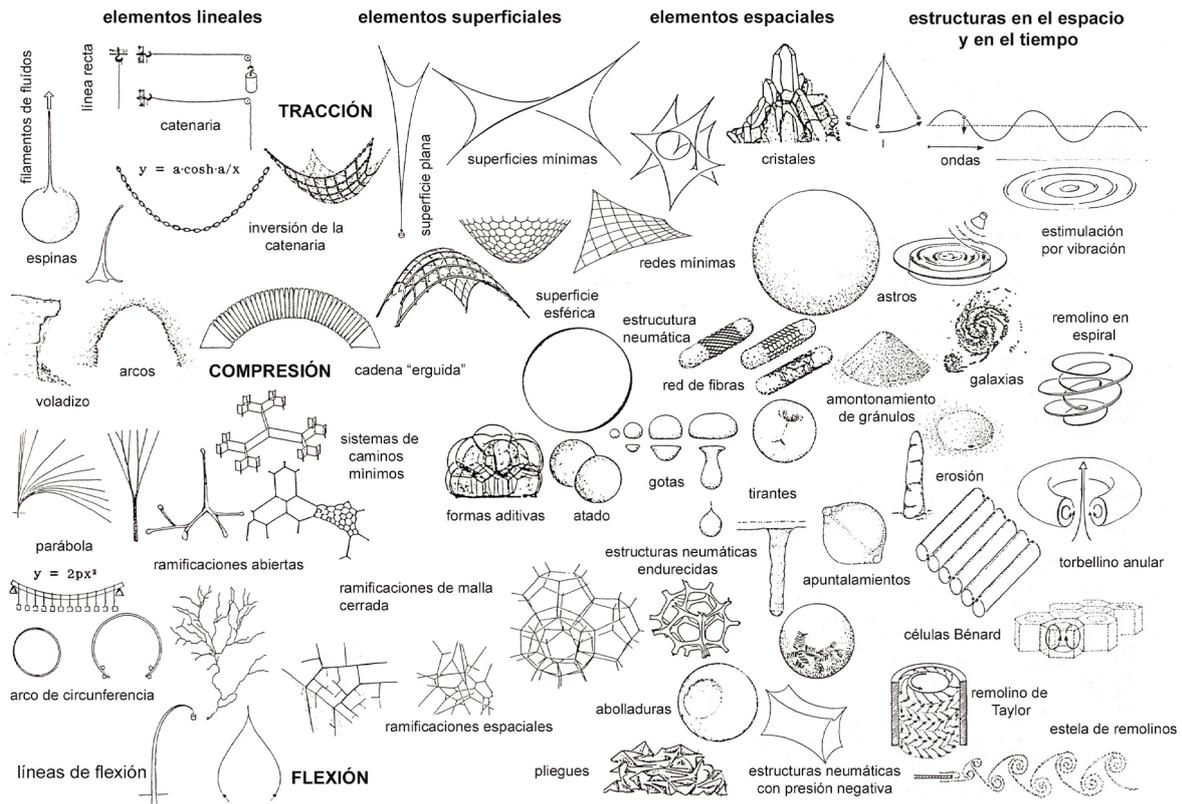
Os processos de auto-formação da natureza inanimada estão presentes em todo o universo. Vão desde a macro-escala de elementos como as estrelas, planetas, nuvens, formações rochosas, à micro-escala de elementos como flocos de neve e formações cristalinas. Sujeitos a forças e processos de formação da Natureza, podemos analisar como as formas expostas a uma ou várias variantes (desde forças a fenómenos naturais) constituem critérios fundamentais para a sua formação.

Na natureza animada, embora esta possua processos de auto-formação comuns aos da natureza inanimada (tal como os padrões), a permanência e perseverança das formas são distintas, pois existe um ciclo de vida e morte, nascimento e decomposição, ou duas fases - animada e inanimada. A sua capacidade de reprodução, divisão e multiplicação traduz um novo processo de formação. A optimização deste processo evolui segundo um processo de eliminação selectiva, em que sobrevive a genética mais forte.

Exemplos de tecnologias animal e humana encontram-se presentes por todo o planeta, e têm vindo a ser desenvolvidas há milhões de anos, tornando-se a base da

---

<sup>123</sup> Cf. GONZÁLEZ, Juan - *Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart: una experiencia de metodología, investigacion y sistematización en la búsqueda de la forma resistente*". p.39. [trad. do a.].



↑ Fig.114 Sinopse das estruturas geradas por processos de auto-formação. Classificação diferenciada segundo as distintas forças generativas.

origem de produtos e de formas animais. Técnicas herdadas geneticamente, tais como as construções dos insectos ou aranhas, têm sido responsáveis pelo seus “produtos” desde um período longínquo.<sup>124</sup>

Um processo de conhecimento transitório de geração em geração permite, através de ferramentas e materiais, criar construções aptas para as necessidades primordiais de sobrevivência - necessidade intrínseca da natureza animal e humana. Tal como os animais, o Homem, com a sua capacidade auto-produtiva de criar objectos técnicos, tem dado resposta às suas necessidades, dando origem a novos produtos e materiais. O mesmo acontece na Arte. Esta é produzida com as tecnologias humanas. Normalmente encontra-se a grande distância da Natureza, pelo que não necessita de modelos, regras ou conversões, permitindo uma abertura inigualável, se compararmos com os exemplos anteriores.<sup>125</sup>

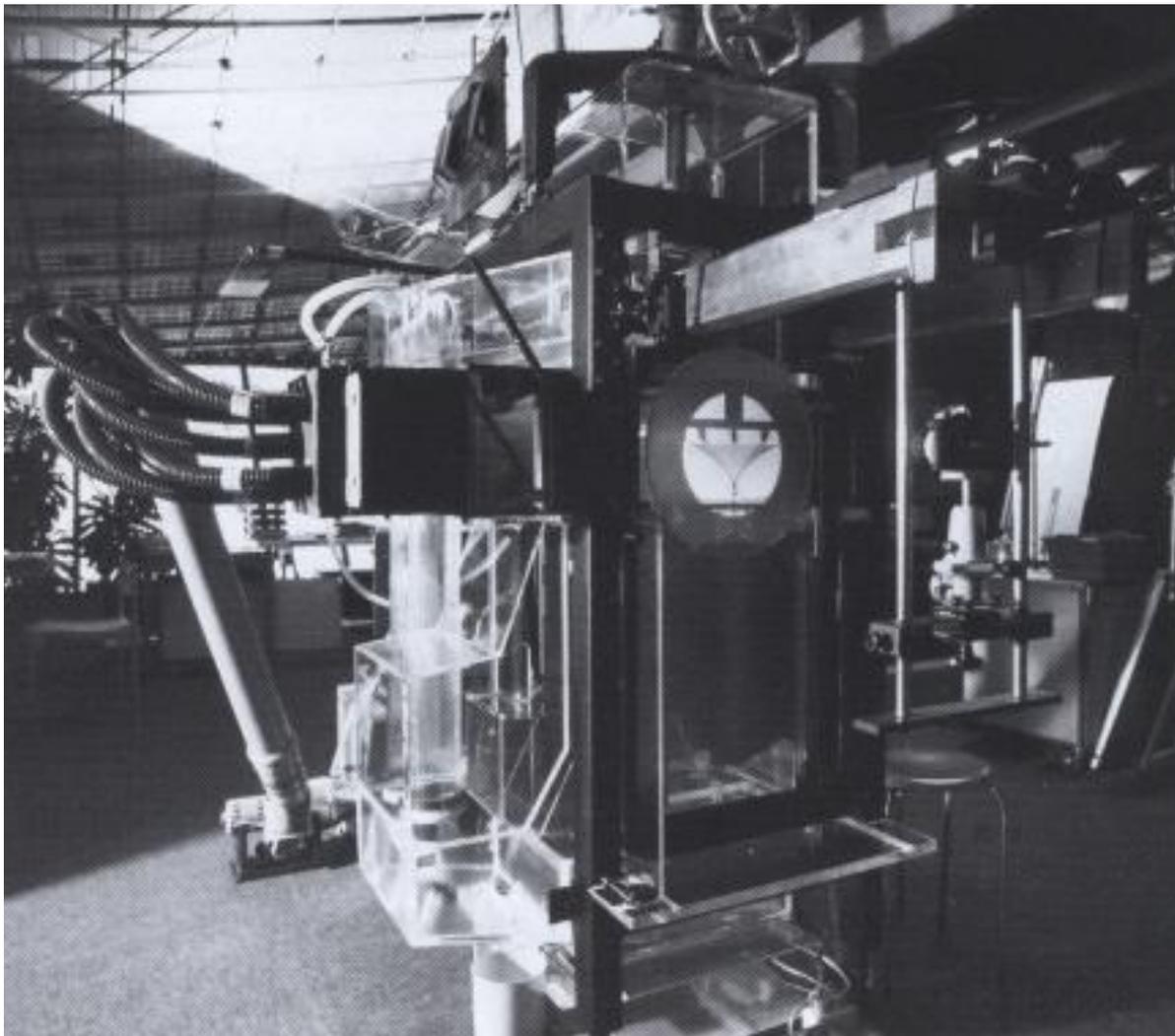
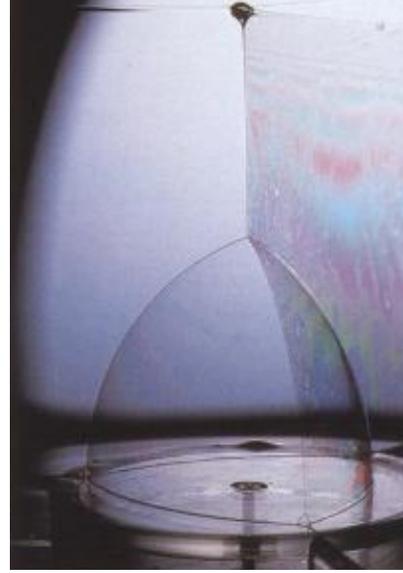
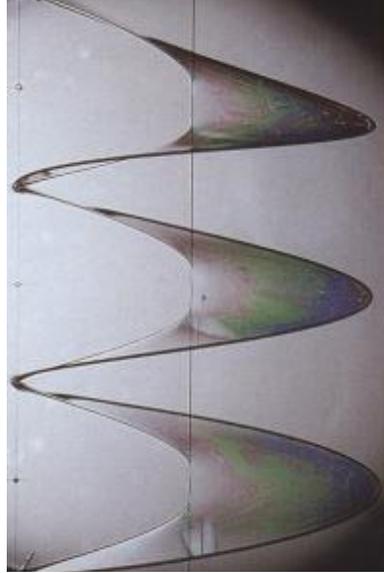
Como já foi referido, seguindo uma base experimental, Frei Otto desenvolveu uma série de modelos e métodos capazes de gerar formas em que os processos e materiais são avaliados de acordo com as realidades do natural, do tecnológico e da arquitectura. Embora sejam inúmeras as experiências feitas pelo IL (também pelos programas de investigação dirigidos por Otto), apenas as mais relevantes e responsáveis pelas técnicas *finding form* presentes neste estudo (entre Arquitectura, Biologia e Frei Otto) serão aprofundadas. Assim, serão alvo de estudo as seguinte técnicas:

- Superfícies mínimas feitas com películas de sabão;
- Estruturas Pneumáticas e Hidráulicas;
- Tendas;
- Construções em rede;
- Construções suspensas;
- Arcos, abóbadas e conchas;
- Estruturas ramificadas;
- Caminhos mínimos.

---

<sup>124</sup> OTTO, Frei; RASCH, Bodo - *Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal*. p.34.

<sup>125</sup> OTTO, Frei; RASCH, Bodo - *Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal*. p.35.



↖ Fig.115 Película de sabão gerada no túnel de vento.      ↑ Fig.116 Superfície mínima gerada pela forma da espiral.  
 ↗ Fig.117 Película de sabão inserida num círculo com lamela    ↓ Fig.118 Máquina de superfícies mínimas no Instituto IL.  
 vertical.

#### 2.4.1. Superfícies mínimas feitas com películas de sabão

As experiências feitas com películas de sabão são possivelmente as experiências mais curiosas e esteticamente apelativas nas investigações do IL e de Frei Otto. Não só pelos resultados obtidos, mas também pela tecnologia utilizada e por constituírem uma componente visual muito própria. As experiências são realizadas num ambiente controlado através de uma câmara fechada (máquina de superfícies mínimas do IL), capaz de reunir as condições necessárias para a experiência e, conseqüentemente, registar os resultados da mesma. Este mecanismo, através de uma inovadora técnica de fotografia, permite registar as geometrias e medir os modelos obtidos, e também conservar os modelos por longos períodos. Os modelos são feitos com água destilada, umas poucas gotas de detergente ou fluído borbulhoso *Pustifix* e a estrutura feita com cabos metálicos finos.<sup>126</sup>

Estas membranas ultra-finas suspensas em cabos são possuidoras de qualidades muito particulares: uma membrana numa estrutura plana origina uma forma plana, numa estrutura não-plana origina formas curvas tipo sela. São sempre contraídas para a menor superfície possível, revelando uma distribuição igualitária de tensão em toda a membrana.<sup>127</sup>

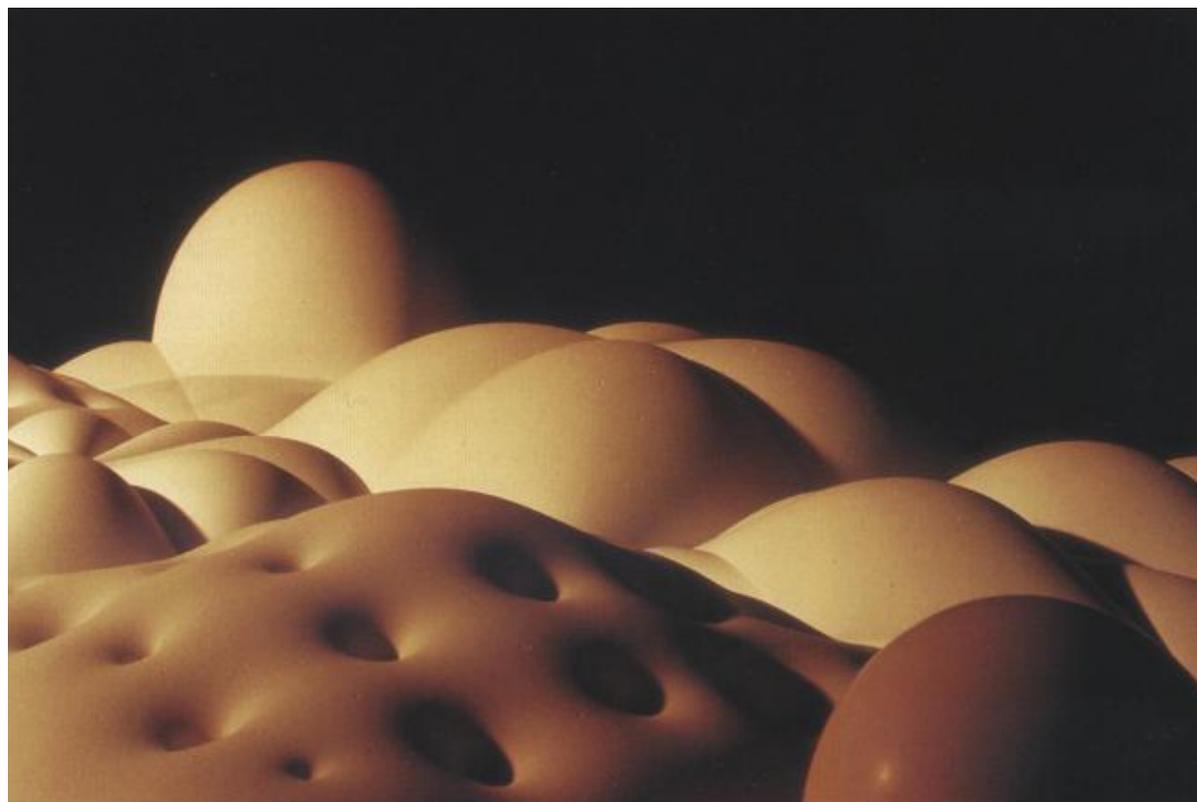
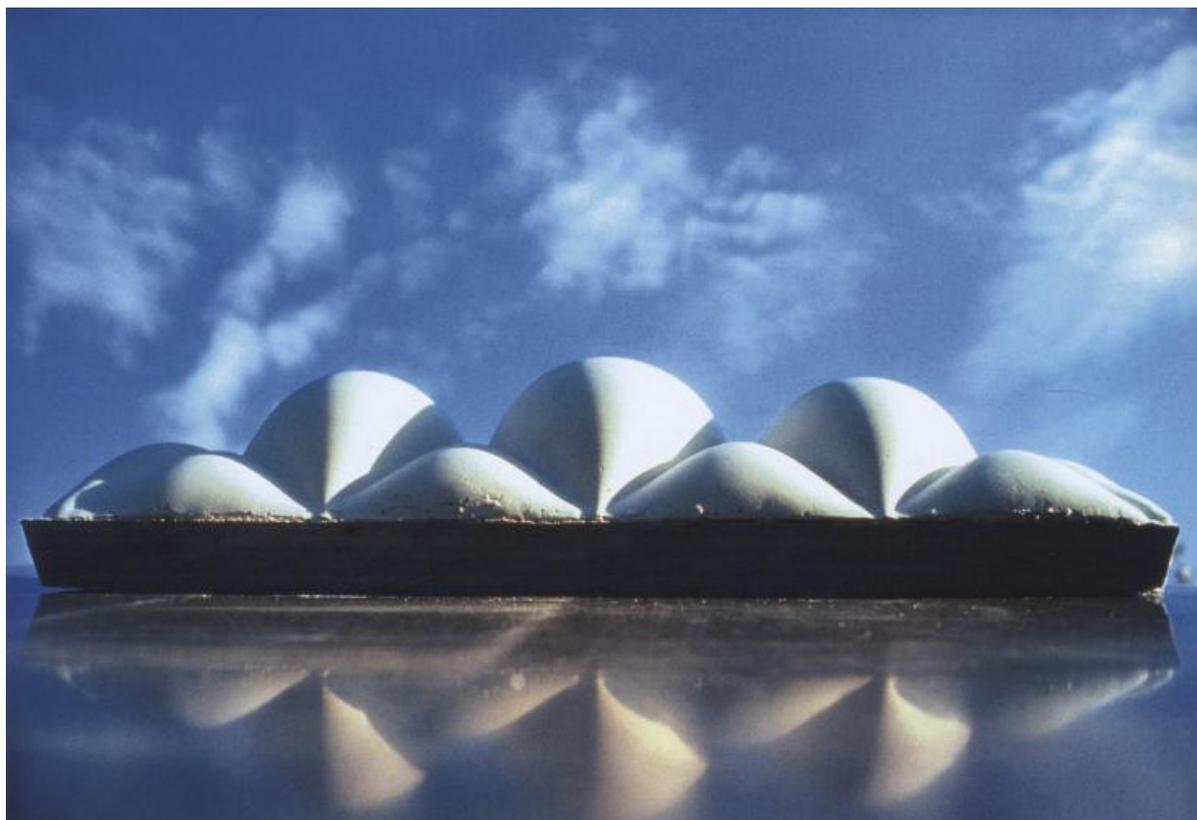
É de salientar a semelhança entre estes modelos e as tendas, em que os princípios de descarga constituem realidades idênticas. Os resultados e observações contribuíram para um novo conhecimento, mas também revelaram o potencial desta ferramenta. Embora seja um processo muito útil para a criação de novas formas para tendas, a sua aplicação não se restringe apenas a esse campo. As formas obtidas podem ser utilizadas em qualquer processo de design e realizadas num amplo número de materiais. Frei Otto comenta que ainda existe uma infinidade de formas e possibilidades a explorar nas experiências feitas com modelos de sabão. As possibilidades de obter bons resultados e descobertas significativas estão ao alcance de todos, uma vez que as inúmeras possibilidades ainda não foram esgotadas.<sup>128</sup>

---

<sup>126</sup> OTTO, Frei; RASCH, Bodo - *Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal*. p.58.

<sup>127</sup> *idem*.

<sup>128</sup> OTTO, Frei; RASCH, Bodo - *Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal*. p.59.



↑ Fig.119 Modelo pneumático reforçado com cabos para Hall Expositivo.

↓ Fig.120 Estudo pneumático realizado em gesso. As formas são reforçadas e manipuladas através cordas e redes ligadas aos pontos de ancoragem.

Os modelos, formas e rigor produzidos minuciosamente nesta investigação seriam utilizados como analogia na obra de Frei Otto, criando novas e complexas formas nos vários “edifícios tenda”, nas estruturas de redes ou nas construções pneumáticas/hidráulicas.

#### 2.4.2. Estruturas Pneumáticas e Hidráulicas

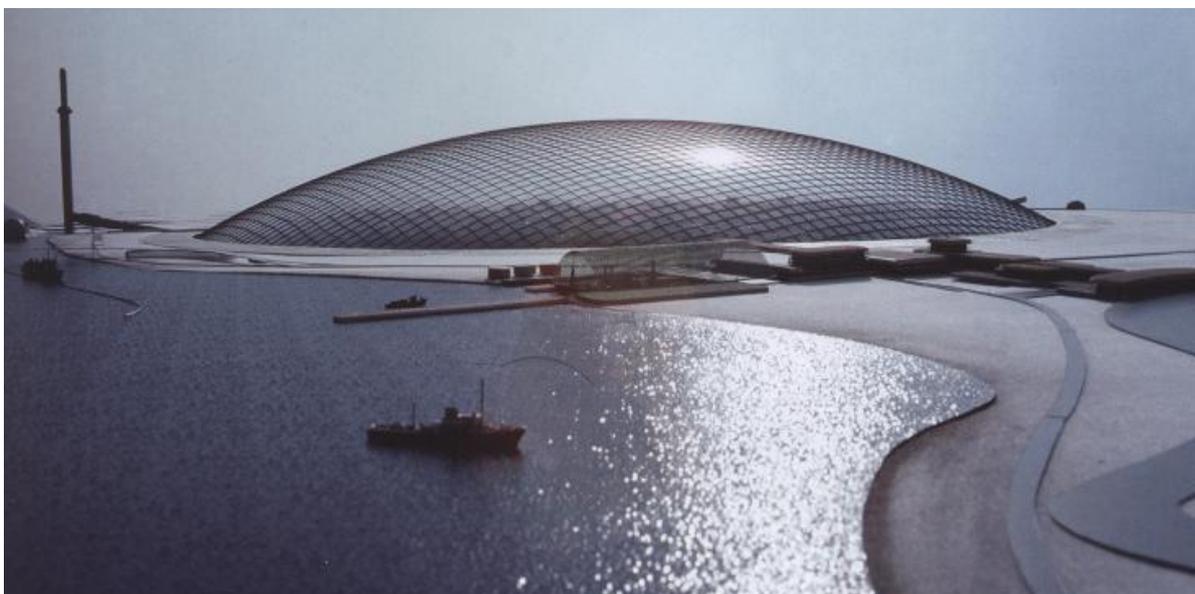
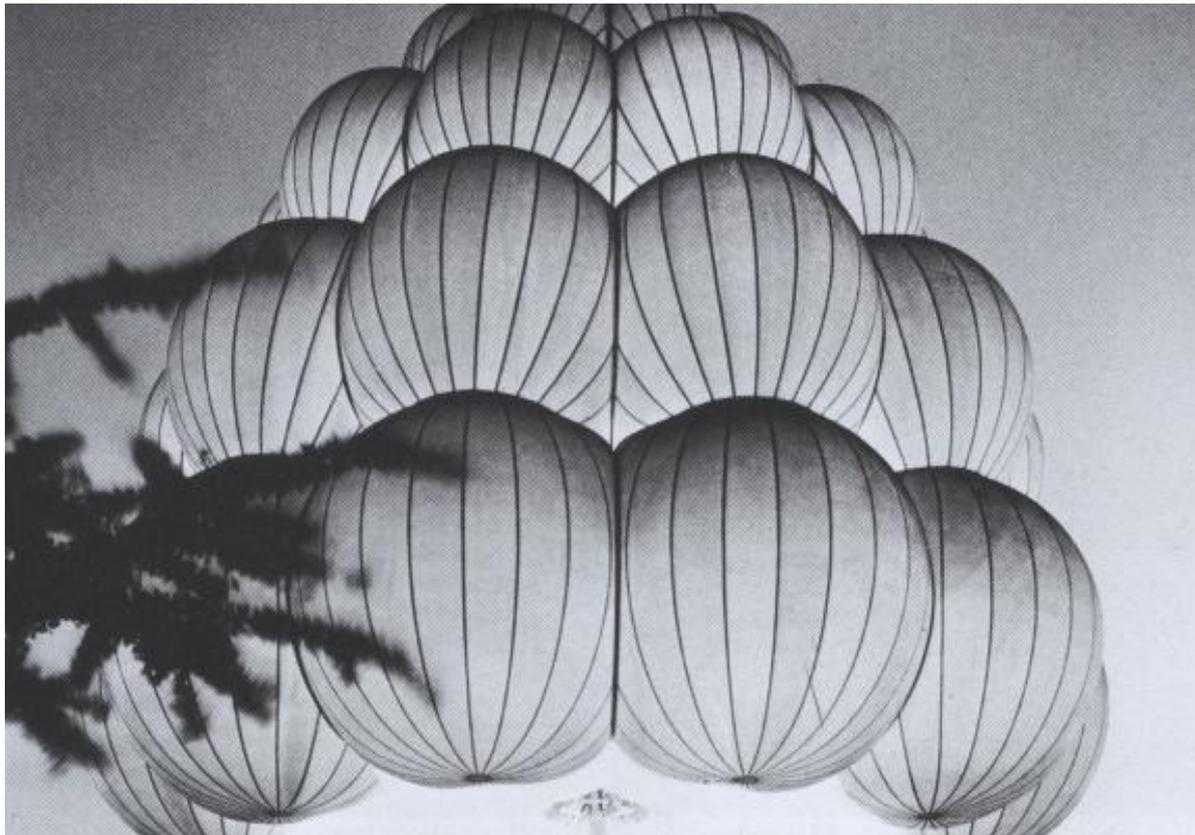
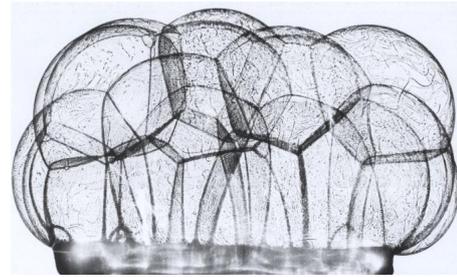
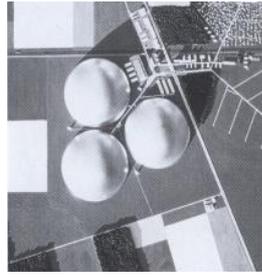
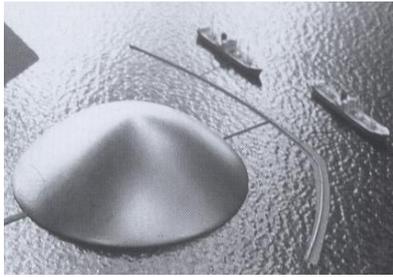
As estruturas pneumáticas ou *air halls* na Arquitectura constituíram mais um dos focos de investigação na obra de Frei Otto e no IL. Estas estruturas têm origem nos exemplos pioneiros dos balões de ar quente de Montgolfier e nas ideias do fabricante de automóveis inglês Frederick William Lanchester. Graças à combinação de gás e ar dos balões, juntamente com a ideia das tendas suportadas por ar interno de William, patenteadas segundo o nº110339 de 1917, foi possível atingir estas estruturas arquitectónicas capazes de cobrir grandes áreas com uma carga estrutural muito reduzida.<sup>129</sup> A génese desta ideia, embora desconhecida e ignorada durante o culminar do séc. XX, possivelmente devido a uma imagem utópica e frágil de uma arquitectura sem precedentes, veio mais tarde a revelar-se como sendo o sistema construtivo mais ligeiro e possivelmente uma das inovações mais radicais e fundamentais da tecnologia de edifícios dos últimos 100 anos.

Estas estruturas consistem basicamente numa construção feita com uma tenda, cujas membranas são suportadas pela pressão exercida pelo ar, sendo possível adquirir inúmeras formas - característica de grande potencial para a prática da forma arquitectónica. Modelos quadrados, rectangulares, flutuantes, marítimos, estufas ou coberturas para grandes superfícies são alguns dos usos possíveis destas estruturas.

Em 1950 dá-se início ao estudo, desenvolvimento e construção de *air halls*, quer com o trabalho do engenheiro aeronauta e piloto norte-americano Walter Bird, quer pelas investigações de Frei Otto em Berlim, que não só desconheciam as investigações de cada um, mas também a pesquisa prévia de Lanchester. Durante anos seguiram caminhos paralelos no desenvolvimento de estruturas pneumáticas e com grande sucesso no ramo: Walter Bird cria a empresa *Birdair* - rapidamente líder mundial; Frei

---

<sup>129</sup> OTTO, Frei; RASCH, Bodo - *Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal*. p.114.



↖ Fig.121 Estrutura pneumática esférica

↗ Fig.123 Estrutura pneumática com películas de sabão.

↓ Fig.125 *City in Antarctica*.

↑ Fig.122 Projecto três domos - central industrial.

→ Fig.124 Pavilhão da Feira Mundial de Nova York.1964.

Otto adiciona em 1952 um novo elemento à construção pneumática - membranas feitas com alumínio. Também constata que, caso exista um aumento da pressão interior (exemplo: sucção do ar exterior), é possível construir uma estrutura sem pólos, mantendo-a estável através da sucção ou de ar quente quando o vento é escasso.<sup>130</sup>

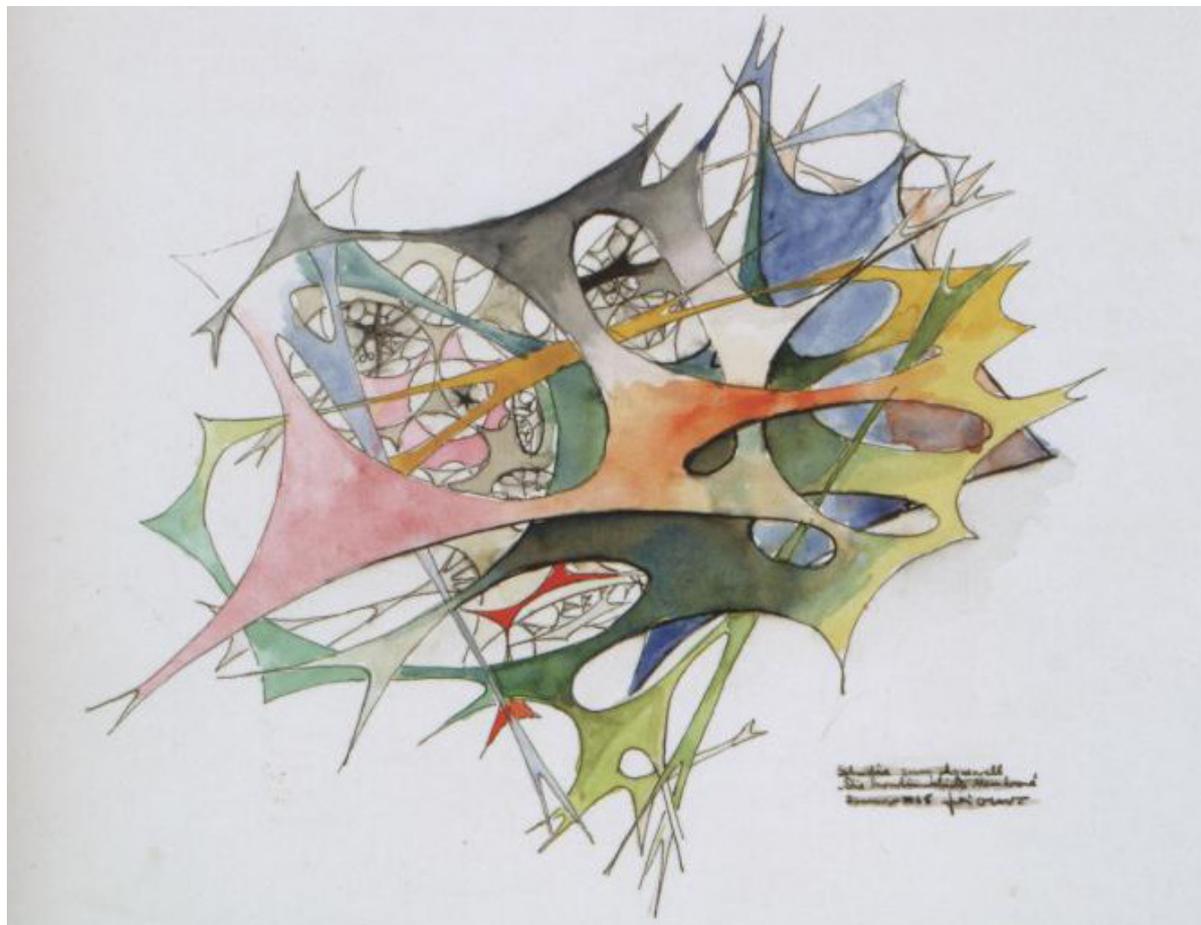
Nos anos seguintes Frei Otto desenvolveu alguns projectos, parte deles construídos, parte deles de pesquisa, designadamente: o projecto de *três domos* com 800 metros de diâmetro para uma central industrial-1956/57 ; o *Pavilhão de exibição para a Floriade* em Roterdão - 1958-61; o projecto de 1970/71 - *Cidade de Antárctica*, capaz de cobrir 2km de zona de residências, mas nunca construído.

Embora estes projectos e investigações fossem dando frutos a novas soluções e tecnologias, alguns imprevistos surgiram pelo meio. Em 1968, uma tempestade no norte da Europa fez voar mais de 200 *air halls* e, em resposta a este problema, estas estruturas foram reforçadas no interior com redes de cordas ou de aço capazes de conferir uma nova e melhor consistência ao modelo arquitectónico. O exemplo deste sucesso tecnológico está presente no *Pavilhão dos E.U.A.* da EXPO 1970 em Osaka. No entanto, outras soluções vão aparecendo ao longo da história destas estruturas, como o uso de líquidos para suportar ou criar tensão nestas membranas, ou o suporte destas estruturas através de pontos de pressão que descarregam directamente no solo, normalmente usados para estufas.

Estes exemplos seriam investigados em Stuttgart durante a existência dos programas de investigação IL e o SBF 230 - *Construções Naturais*. A investigação e procura de processos de busca da forma através de processos de modelação e de vida presentes na Natureza, como células básicas, organismos e criaturas vivas, revelaram-se um valioso auxiliar no estudo das estruturas pneumáticas e, conseqüentemente, contribuíram para uma melhor compreensão das formas vivas da natureza. Surge novamente uma simbiose entre Natureza e Arquitectura, capaz de traduzir soluções naturais em modelos ou tecnologias, otimizando a prática arquitectónica.

---

<sup>130</sup> OTTO, Frei; RASCH, Bodo - *Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal*. p.116.



↑ Fig.126 *Wave Hall* da Exibição do Jardim Federal de Hamburgo.1963.

↓ Fig.127 Estudo a aguarela - *The Continuous membrane*. Frei Otto, 1965 .

### 2.4.3. Tendas

*“As tendas são as construções mais antigas entre os homens. Têm sido usadas como alojamento em várias culturas por milénios. Tendões de várias formas, construções e equipamentos têm surgido de acordo com os materiais, condições climáticas e construções sociais. O desenvolvimento contínuo através dos vários estágios da história trouxe uma optimização da sua estrutura, como pode ser visto nas tendões Bedouin, nas “yurts” asiáticas, nas tipis Norte Americanas, mas também nas tendões de circo europeias. Formas clássicas têm sido desenvolvidas dentro de uma arte de fazer tenda que amadureceu empiricamente e em termos de artesanato.”*<sup>131</sup>

A construção de tendões e membranas foi um tema fortemente explorado na obra de Frei Otto. As pesquisas feitas com as películas de sabão tiveram um papel determinante na busca da forma destas, oferecendo novas formas e usos destas estruturas mínimas. Por outro lado, deve-se mencionar a “íntima” relação de Otto com o empresário Peter Stromeyer da *L. Stromeyer & Co.*, o maior fabricante de tendões da Alemanha. Graças a este, foi possível pôr em prática grande parte do conhecimento reunido ao longo das investigações.

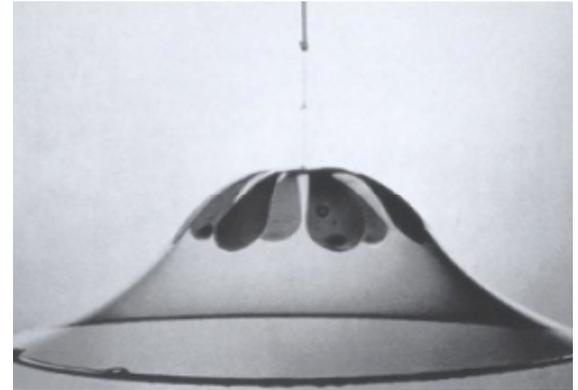
Embora seja ambíguo definir a “tenda vulgaris” como um objecto arquitectónico, é de salientar que a criação deste tipo de superfícies mínimas deu o seu contributo para as construções em rede e, em consequência, para um dos projectos mais emblemáticos de Otto - *O Parque Olímpico de Munique* (caso de estudo desta dissertação). Através das suas pesquisas, Frei Otto foi o primeiro a estudar a ligação entre forma e estrutura e, assim, descobriu o significado da auto-formação de superfícies mínimas para o desenho e forma das suas estruturas.<sup>132</sup>

Segundo Frei Otto, uma tenda consiste na construção de um plano de carga esticado feito em material laminado, tecidos ou redes. A estrutura é constituída por um ou mais suportes de compressão e membranas tensionadas.<sup>133</sup> Uma das qualidades destas construções reside na liberdade inesgotável no que diz respeito à forma. Para

---

<sup>131</sup> OTTO, Frei; RASCH, Bodo - *Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal*. p.74. [trad. do a.].

<sup>132</sup> OTTO, Frei; RASCH, Bodo - *Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal*. p.74.



↖ Fig.128 Entrada da Exposição do Jardim Federal. 1957.  
 ↙ Fig.130 Tenda de dupla saliência da Exposição.1957.  
 ↓ Fig.132 Tendas laterais do Clube Diplomático de Riyadh.

↗ Fig.129 Vista lateral da entrada Exposição.1957.  
 ↘ Fig.131 Superfície mínima da tenda anterior.

esta busca, Frei Otto desenvolveu várias técnicas, modelos e métodos ao longo da sua pesquisa, como a criação de superfícies mínimas através das películas de sabão. Todos os resultados construídos por Otto conseguem ser reproduzidos pelas várias técnicas desenvolvidas, desde as películas de sabão ao uso de películas super-finas de borracha ou redes. Mais tarde, a partir de 1970, o desenho assistido por computador CAD ganharia um novo destaque no desenvolvimento destas construções, embora nunca tenha rejeitado os modelos prévios. Deste modo, através do uso moldável destes modelos, o alcance de formas à sua disposição resultou numa variada quantidade de tipos de tendas. Estas são divididas por Frei Otto segundo os elementos formais de cada uma:

*Vela simples* – consiste numa tenda em que as forças são suportada pelas margens e pontas através de cordas ou cabos.

*Tenda bicuda* – suportada por um ponto e depois distribuída segundo cordas ou cabos para vários pontos de forma contínua.

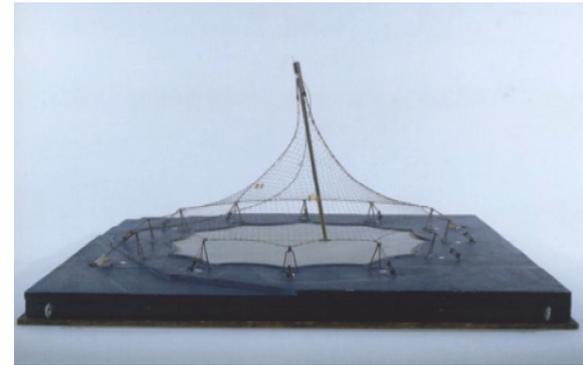
*Tenda arqueada* – a distribuição de forças é feita de forma linear, através da compressão da forma em arco, evitando assim o seu colapso.

*Tenda curvada* – suportada através de duas dimensões, em que as forças são distribuídas ou de forma homogénea ou através de pontos individuais.

Como já foi referido, este tipo de construção constituiu grande parte da obra de Frei Otto. As tendas fizeram parte de vários projectos ao longo da sua carreira, revelando um conjunto rico de diferentes exemplos e projectos. Ordenados cronologicamente, há que destacar os seguintes projectos:

A entrada da *Exibição do Jardim Federal* de 1957 em Colónia, Alemanha. A entrada foi feita através de uma “tenda arqueada” com 34m de comprimento e 24m de largura. Juntamente com a entrada, dois pavilhões construídos segundo o modelo “tenda curvada”, foram gerados a partir dos processos de formação acima mencionados.

Em 1963, outro projecto surge para a *Exposição de jardins de Hamburgo*, constituído por um grupo de tendas em forma de “ondas”, ocupando uma superfície de 125m<sup>2</sup> fabricada em algodão. Duas tendas também são desenhadas para ocasiões



↖ Fig.133 Construção em rede metálica.

↙ Fig.135 Sports Hall de Jeddah.

↗ Fig.134 Rede do aviário de Hellbrunn.

↘ Fig.136 Modelo da Tenda IL.

↓ Fig.137 Pavilhão Alemão da Exposição Mundial de Montreal.1967.

especiais: a recepção da Rainha Elizabeth II no *Festival de Dyce* perto de Aberdeen, na Escócia, e uma segunda que nunca chegou a concretizar-se em Sheytland Island of Sullom Voe. A tenda de Aberdeen cobria uma área de 33000m<sup>2</sup>, possuindo uma forma distorcida para manter a estabilidade estrutural garantida.

Outros exemplos surgem na obra de Frei Otto com uma nova caracterização. É o caso do *Clube Diplomático Riyadh* de 1988, também conhecido como *Tuwaiq Palace*: o complexo ondulante foi ampliado com a inserção de formas redondas e semelhantes a uma concha. Estas formas permitiram uma maior área dotada de sombra, em perfeita harmonia com a curiosa forma do palácio. No interior surge outro tipo, a *Heart-tent*. Esta tenda dos Jardins do Clube é composta por uma malha estrutural de dez segmentos, cada um deles constituído por 200 painéis de vidro de 8 mm pintados pela mão de Bettina Otto. Uma nova caracterização integra-se com a vegetação rica e os elementos naturais do jardim.

Estas tendas surgem ao longo da obra de Frei Otto com distintas formas. Na maior parte das vezes, conseguidas através dos seus peculiares processos da busca da forma, deram origem a resultados incríveis, mas também vanguardistas neste ramo das construções ligeiras. Muitos destes exemplos apoiaram-se nos princípios de formação das experiências feitas com películas de sabão e, por sua vez, em analogias de fenómenos naturais, como bolhas, ondas, abrigos ou construções animais. Este processo de formação tem continuidade no próximo sistema construtivo apresentado – construções em rede.

#### 2.4.4. *Construções em rede*

Este tipo de construção ligeira segue os mesmos princípios das tendas feitas através de membranas, embora estas possuam a capacidade de cobrir áreas de maior dimensão. Podem ser construídas através de cordas ou de cabos metálicos e, como nas tendas, a variedade de formas é infinita. São modelos dotados de uma considerável rapidez e versatilidade construtiva, processados de modo standardizado. Este processo construtivo possui maior liberdade do que o uso de membranas, porquanto, através de uma malha articulada, pode cobrir qualquer tipo de superfície e adaptar-se a qualquer



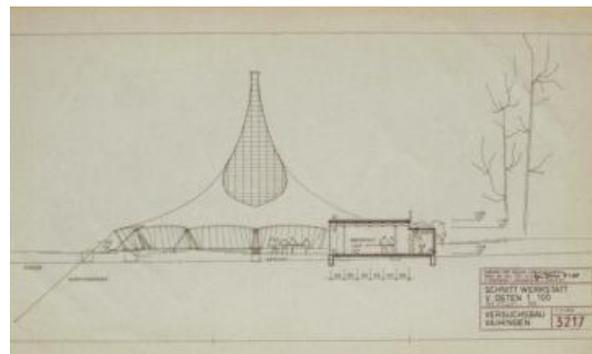
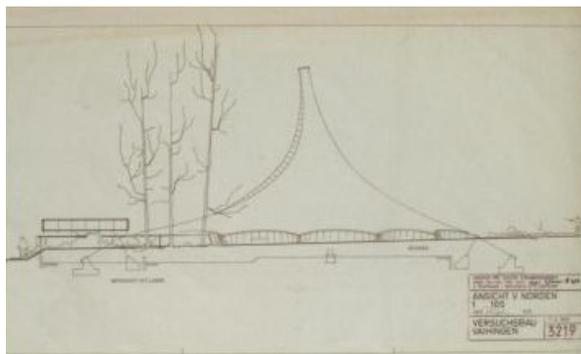
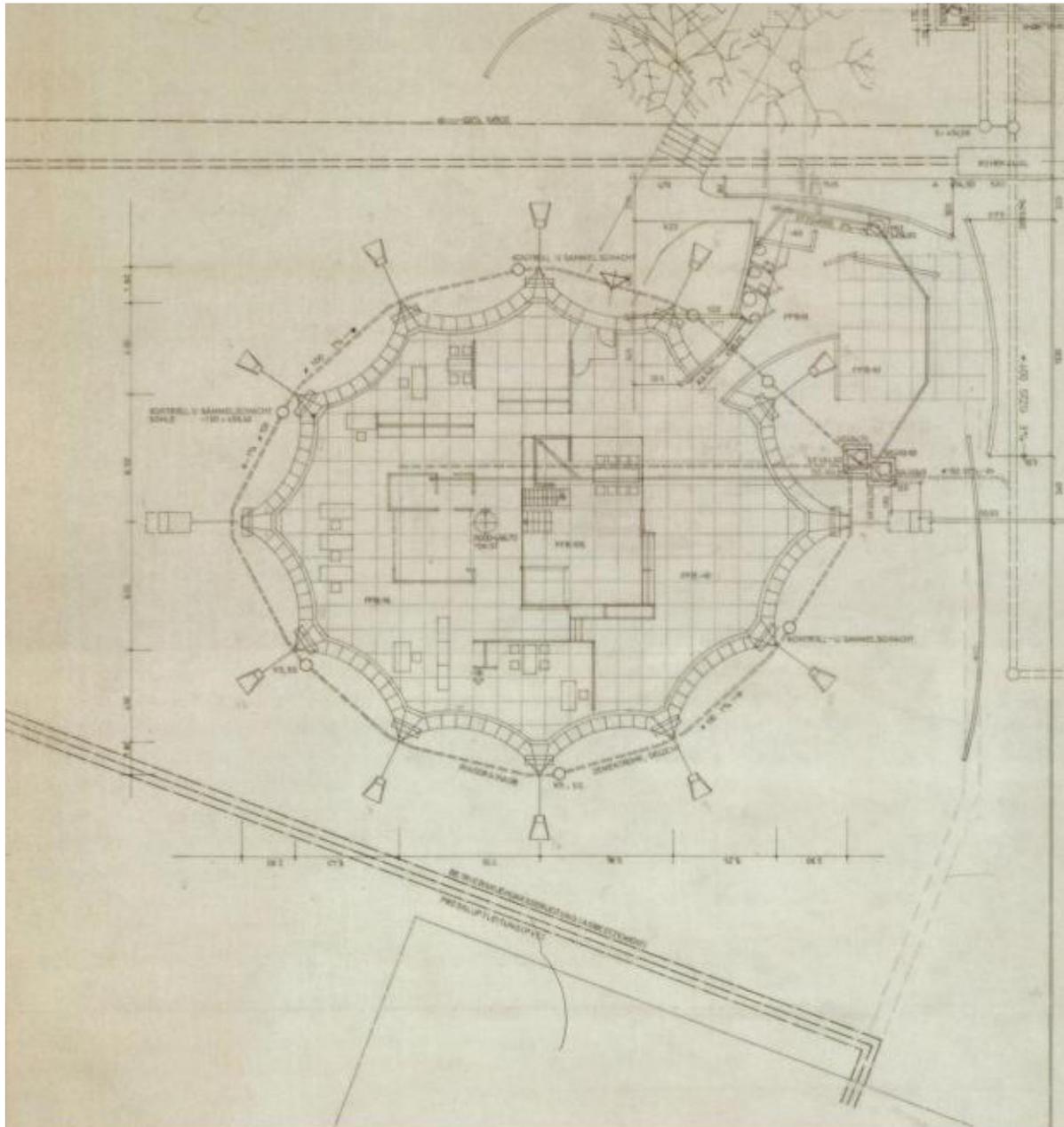
forma ou distorção, se necessário. Para além desta qualidade, a distorção de elementos geométricos da malha (como é o caso de malhas rectangulares ou quadrangulares) pode transformar-se em formas losangulares.

A pesquisa destas construções apoiou-se em várias técnicas, tecnologia e processos de formação presentes nos grupos de investigação de Otto, em que elementos naturais ajudaram este processo construtivo. Estes modelos surgem como elementos impulsionadores para a pesquisa e projectos concebidos ao longo da sua obra, reflectindo-se numa variedade de resultados. Assim, vários modelos foram construídos essencialmente segundo a técnica de películas de sabão, mas também em madeira.

A maquete possui um papel fundamental neste sistema construtivo, posto o que será necessário situar o período em que o desenvolvimento e construção destes modelos foram realizados. O primeiro exemplo surge através do *Pavilhão Suíço Neige et Rocs* construído em 1963 para a *Exposição Nacional da Suíça*, em Lausanne. É de salientar que a tecnologia e as ferramentas arquitectónicas neste período eram limitadas e reduzidas, o que dificultava a materialização destas construções. Como em Antoni Gaudí, a execução de modelos à escala, com o uso de materiais e de proporções semelhantes, permitiu uma melhor compreensão e adaptação destes à realidade. Assim, a distribuição de forças exercida nas redes seria testada nestes modelos, possibilitando uma recolha de dados cruciais para a realização deste sistema construtivo. As construções naturais, como as teias, também constituíram uma valiosa fonte de informação para a sua execução; com elas foi possível estudar e aprofundar o conhecimento da relação entre a forma e estrutura.

Por outro lado, sem a existência do desenho assistido por computador (CAD) e face à complexidade e organicidade da forma na maior parte dos exemplos apresentados por Otto, só através da maquete é que seria possível controlar e definir a escala como o objecto arquitectónico. Em resultado deste estudo e processo de investigação surge o Parque Olímpico de Munique, o qual, na nossa perspectiva, reúne todas as qualidades, investigações, técnicas, tecnologias e analogias de forma única e exemplar.

Na obra de Frei Otto, e em harmonia com este sistema construtivo, devem-se destacar os seguintes projectos: Em 1965 Frei Otto e Rolf Gutbrod ganham a



↑ Fig.140 Planta do Instituto de Construções Ligeiras IL.  
 ↙ Fig.141 Alçado Este do Instituto IL.

↘ Fig.142 Alçado Norte do Instituto IL.

competição do *Pavilhão Alemão* na *Exposição Mundial de Montreal*. Edificado com uma rede de cabos de aço de 12mm de espessura e espaçamento de 50 cm, criaram uma rede com 15 metros de largura; a protecção climatérica desta é feita através de um membrana de poliéster revestida a PVC. O projecto foi estudado nas instalações do IL, onde um modelo feito à escala de 1:75 serviu para testar as forças e descargas desta cobertura. Completados os estudos e projecto, esta cobertura foi construída nas instalações do IL e enviada por módulos para Montreal. A sua construção seria feita em parceria com Peter Stromeyer, revelando a facilidade e particularidade de estandardização deste sistema construtivo.

Durante os estudos do pavilhão de Montreal seria construída outra estrutura em rede. Esta estrutura cobre uma superfície de 460m<sup>2</sup>, é constituída por uma malha de cabos metálicos flexíveis e tensionados em doze pontos de apoio, nos quais são exercidas a tensão e as descargas. Depois dos resultados e estudos recolhidos e já segundo as intenções de Otto, esta estrutura foi deslocada para o centro de investigações do IL, onde passou a ser utilizada permanentemente. A cobertura seria completada e cerrada com uma fachada circular de vidros, permitindo a sua utilização permanente. Esta estrutura acabou por transformar-se num local permanente, que não só possibilitou o ensino durante 25 anos, mas também outros eventos, como seminários, conferências e diversas actividades.

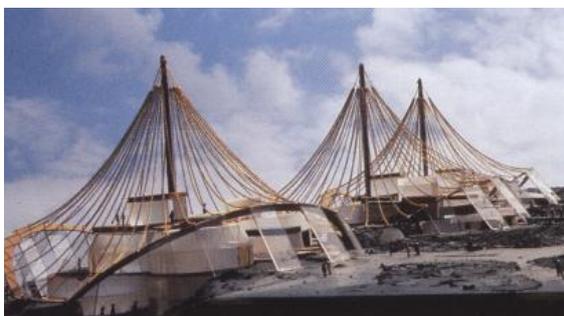
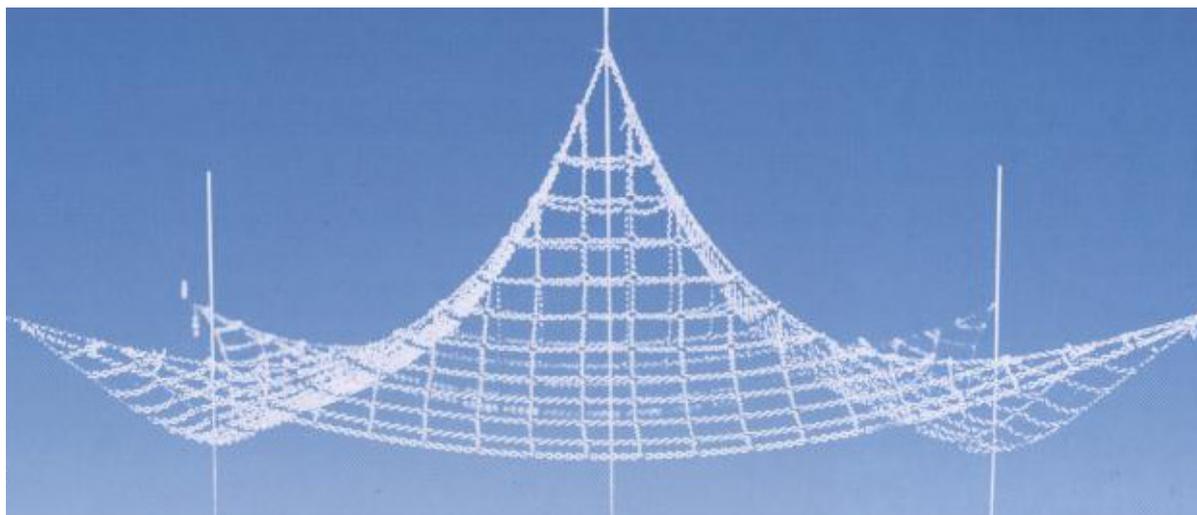
Outros projectos seriam construídos nos anos seguintes, como a *rede do aviário do jardim zoológico Hellaburnn* de Munique, o *pavilhão de desportos de Jeddah* em 1980, ou o *Parque Olímpico de Munique* de 1972, que será devidamente analisado como o caso de estudo desta dissertação.

#### 2.4.5. Construções suspensas

Foi no atelier de seu pai “[...] quando tentei pela primeira vez construir estas formas invertidas e ainda hoje brinco com isto: um brinquedo maravilhoso.”<sup>134</sup>

---

<sup>134</sup> SONGEL, Juan Maria - *Frei Otto. Conversación con Juan Maria Songel*. p.31. [trad. do a.].



↑ Fig.143 Modelo de construção suspensa feito com correntes.

← Fig.144 Construção suspensa para a Academia Médica. → Fig.145 Academia Médica de Ulm.

↓ Fig.146 Proposta para o concurso do Estádio Olímpico de Berlim. 1969.

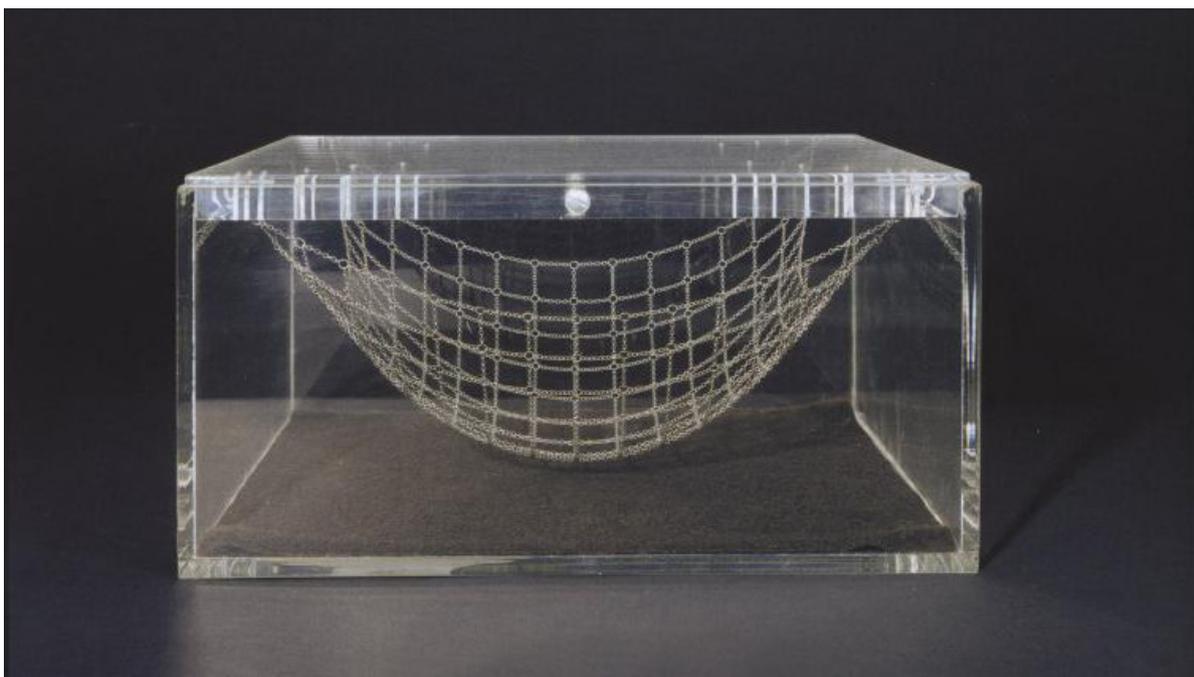
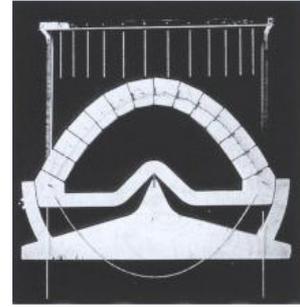
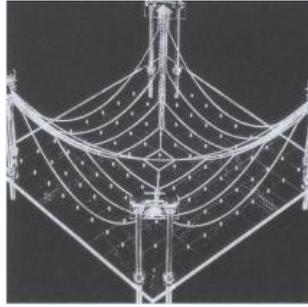
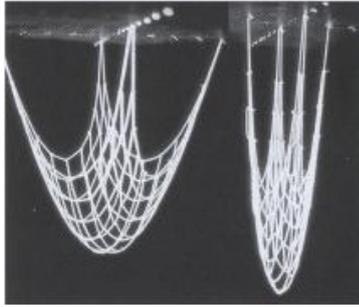
Este sistema construtivo foi um dos sistemas mais explorados por Frei Otto durante as suas investigações. Deste estudo extenso derivam as construções em rede, tal como os arcos, abóbadas ou conchas.

As construções suspensas seguem o princípio básico de uma catenária. Estas construções são curvadas em apenas dois pontos e estabilizadas, segundo o próprio peso em conjunto com o ângulo da sua curvatura. Este tipo de construção revelou-se como um exemplo simples e eficaz, encontrado em processos autónomos de formações naturais, tendo sido profundamente explorado na arquitectura de Gaudí e posteriormente na obra de Otto. Em grande parte dos casos, forma o princípio básico das pontes e coberturas suspensas, sendo o segundo exemplo conhecido também como “tendas pesadas”.

Este sistema possui uma diversidade de formas e de composições capazes de se materializarem em diversos materiais, mas também possui a particular aptidão de cobrir grandes vãos e secções minimais cruzadas. As suas formas estão ligadas directamente à Natureza, não pela composição da forma, mas pelos princípios que a regem. As leis da Natureza são o principal elemento criador desta tipologia construtiva, originando formas regidas pelos princípios básicos da Física.

Na obra de Frei Otto surgiram vários exemplos de tendas suspensas, como o centro de conferências de Mecca, desenhado por ele em conjunto com Rolf Gutbrod. Outro exemplo deste sistema construtivo é a *Companhia Wilkhahn* em Bad Muender. Embora não tenham sido executados, também são de salientar os projectos do *Estádio de Stuttgart* e o projecto temporário de execução rápida e acomodação para a *Academia Médica de Ulm*.

Devido à versatilidade e facilidade construtivas, este tipo de construções mereceu a atenção e o estudo por parte de Frei Otto e do IL, onde vários modelos de distintas formações e materiais foram elaborados, sendo parte deles construídos, e outra parte aproveitados para o extenso estudo feito pelos grupos de investigação de Stuttgart.



↖ Fig.147 Modelo suspenso de correntes.                      ↑ Fig.148 Modelo invertido de correntes para projectar abóbada.  
 ↗ Fig.149 Demonstração da inversão de uma catenária para calcular a linha de pressão de um arco.  
 → Fig.150 Abóbadas criadas a partir de tiras de tecido endurecidas com gesso.  
 ↓ Fig.151 Cúpula invertida de correntes suspensa por quatro pontos.

#### 2.4.6. Arcos, abóbadas e conchas morfo-resistentes

Tal como as construções suspensas, estes sistemas construtivos encontram-se intrinsecamente ligados aos princípios utilizados nas catenárias, e também aos processos de formação própria presentes na Natureza. Os desenhos de arcos, abóbadas e conchas morfo-resistentes podem ser calculados e definidos segundo o processo básico de inversão de uma catenária ou de um modelo. Torna-se exequível o cálculo da linha perfeita de pressão capaz de traduzir a curvatura necessária para sustentar uma estrutura curva, como um arco ou abóbada. Durante a sua carreira, Frei Otto rapidamente apercebeu-se do potencial presente neste exercício, pelo qual é possível transferir um processo autónomo de formação presente nas estruturas em tensão para estruturas em compressão. <sup>135</sup> *“Em Chartres, comecei a experimentar o princípio de inversão - por outras palavras, a desenvolver arcos em estados suspensos - e continuei o trabalho em casa. É o simples caso de molhar um lençol em gesso, pendurá-lo e invertê-lo quando estiver enrijecido. Foi o meu pai que me deu esta ideia. Nessa altura ainda não tinha conhecimento de Gaudí [...].”*<sup>136</sup>

Este princípio de inversão é fruto das descobertas humanas ao longo dos séculos, sendo formulado pela primeira vez em 1676, por Robert Hook. É desenvolvido mais tarde como “metodologia de busca da forma” aplicada à arquitectura, através do arquitecto Heinrich Hubsch e pelo trabalho de Gaudí, segundo os seus complexos e belos modelos tridimensionais invertidos de correntes. <sup>137</sup>

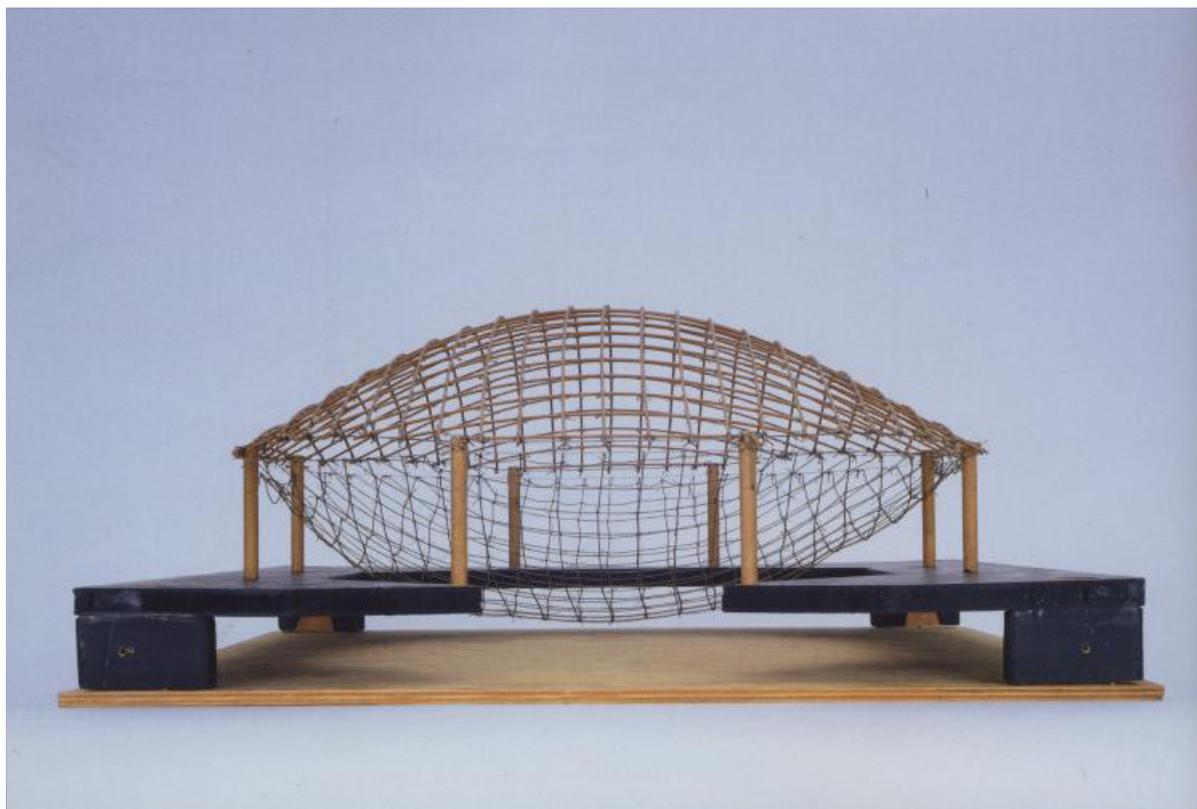
Através do uso desta metodologia, é possível estudar e obter uma vasta diversidade de formas arqueadas, oferecendo um sólido ponto de partida para a definição de formas arquitectónicas desta natureza. Seguindo as referências históricas, constatamos o uso predominante de geometrias maioritariamente derivadas do círculo e do segmento deste, especificamente nos exemplos de abóbadas. A construção destas formas foi realizada durante vários anos num âmbito de “ignorância”, em que vários exemplos de formas abobadadas surgiram muito próximas do princípio das catenárias. Apenas no séc. XVII é que surge o reconhecimento deste princípio

---

<sup>135</sup> NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p.24.

<sup>136</sup> Otto, Frei; Rasch, Bodo - *Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal*. p.134. [trad. do a.].

<sup>137</sup> NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p.24.



↑ Fig.152 Modelo comparativo entre uma cúpula executada com ripas de madeira e uma malha de correntes.  
↓ Fig.153 Modelo suspenso para o estudo morfológico e estrutural do projecto de Mannheim.

arquitectónico/estrutural. Até à data, a relação entre a catenária e a linha de pressão foi um conhecimento que caminhou à sombra das construções arquitectónicas.<sup>138</sup>

Não obstante, este tipo de metodologia revelou um suporte e medidas capazes de traduzir a curvatura necessária de arcos, abóbadas e “conchas”. Desta forma, o cálculo estrutural de uma forma arquitectónica sofre um acto de simplificação, ainda que a estabilidade estrutural destas formas deva ser posteriormente submetida à prova, por intermédio dos vários testes e análises normalmente realizadas no âmbito da engenharia estrutural.

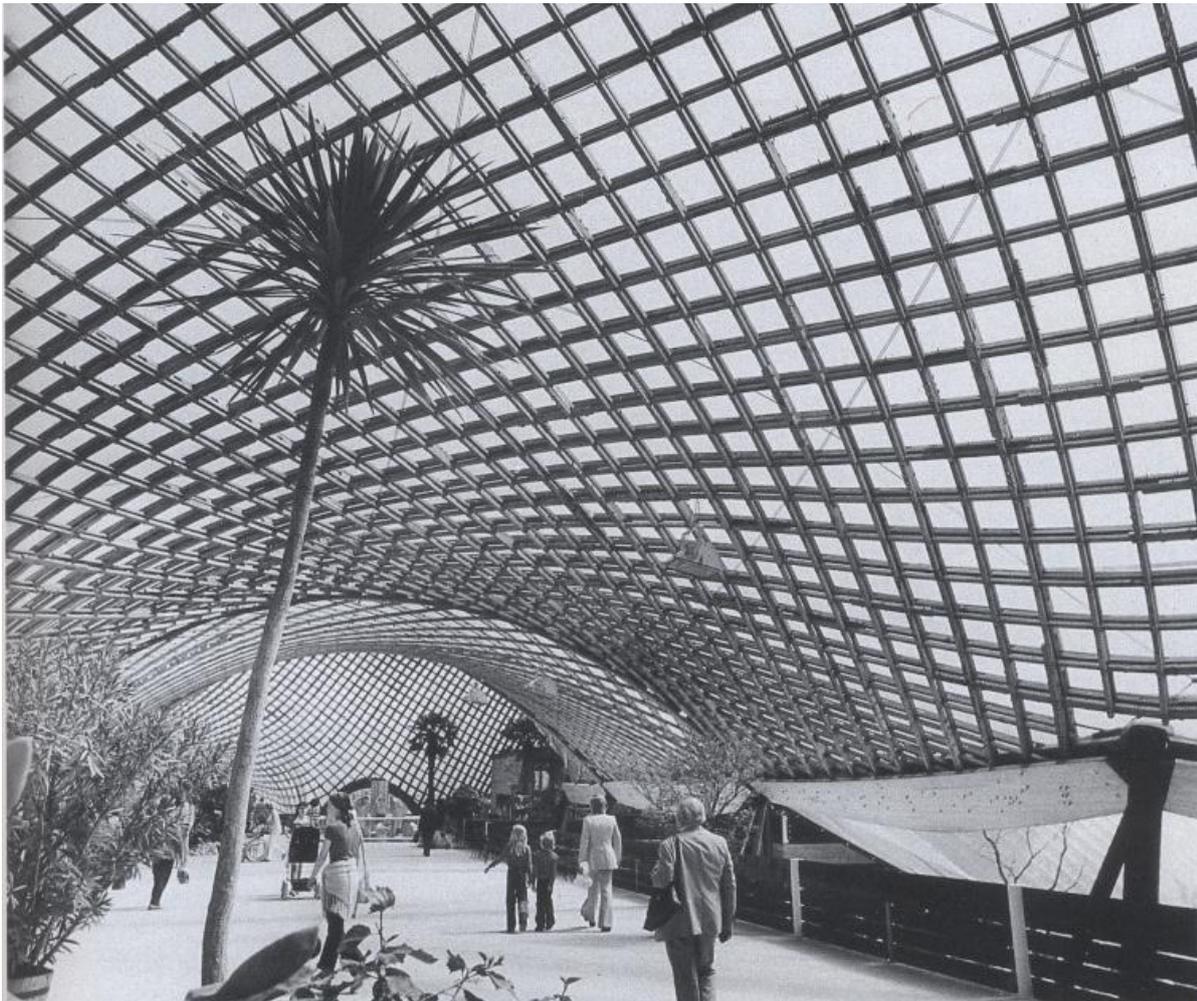
Frei Otto inicia então um vasto estudo desta metodologia empírica, quer durante a sua dissertação, quer durante a sua participação nos grupos de investigação já referidos. A partir de 1940, modelos como membranas de sabão, correntes e teias de várias composições geométricas e tiras de gesso, todos estes invertidos, foram alguns dos objectos de estudo ao longo da sua carreira. Outros exemplos, como as estruturas de superfícies, são também resultado desta investigação. Desta segunda tipologia, em específico as superfícies de dupla curvatura, é possível constatar, dentro de certos limites, a transferência de carga sem comprometer a forma estrutural.

Tal como os exemplos anteriores, a variedade de superfícies conseguidas através do uso desta metodologia revelou o potencial e capacidade redutora da relação entre a busca da forma, dos materiais e sua relação estrutural. Assim, a conversão análoga presente no uso de modelos invertidos traduzidos para exemplos arquitectónicos confere, num acto redutor, uma alternativa à criação de formas, em que a relação entre forma, força e massa, é atingida segundo um processo directo, ao invés de outras componentes arquitectónicas.

De entre os vários modelos invertidos de Frei Otto, é possível constatar a presença de analogias entre as formas arquitectónicas exploradas e o universo biológico. Se considerarmos que o método construtivo certamente não imita a Natureza, no entanto as estruturas possuem valores comuns às formas naturais. A sua morfologia poderá ser entendida como algo “natural”, se avaliarmos os seus princípios reguladores da forma, patenteada em vários exemplos em que, a semelhança entre eles é bastante equiparável: desde a simples catenária suspensa, presente em processos de formação naturais como as várias teias de aranha, até às cúpulas suspensas semelhantes às

---

<sup>138</sup> OTTO, Frei; RASCH, Bodo - *Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal*. p.136.



↑ Fig.154 *Multihalle* de Mannheim projectado por *Mutschler, Langner und Partner* e *Frei Otto*. 1971.  
↓ Fig.155 Interior do *MultiHalle* de Mannheim.

conchas de bivalves ou carapaças de frutos secos, como também algumas das cúpulas invertidas semelhantes aos esqueletos dos radiolários. Estas são algumas das analogias presentes nesta tipologia de modelos e formas naturais.

Dos vários estudos realizados por Frei Otto, deve-se destacar o modelo de DEUBAU de 1962, localizado em Essen: uma *latisse shell* foi construída, tornando-se exemplo para vários projectos deste âmbito por todo o mundo; o modelo suspenso é constituído por tópicos e parafusos em U, servindo de estudo para a forma pretendida. Deste modelo deriva outro projecto, realizado pelos estudantes de Otto na Academia de Verão de Salzburg, e que tem por finalidade a realização de uma cobertura para o *Volksparr Rehberg* de Berlim, cujo revestimento foi feito através de folhas de plástico pintadas por Hermann Finsterlin.<sup>139</sup>

Hoje em dia o processo de divisão destas complexas formas pode ser calculado com o auxílio dos programas matemáticos virtuais ao dispor do arquitecto. No entanto, os modelos utilizados por Otto ainda constituem o principal ponto de partida para a materialização de projectos deste âmbito, especialmente para o respectivo cálculo.

Outra *latisse shell*, e possivelmente a mais interessante da sua obra, é o *Projecto de 1971 da Exposição Federal de Jardins*, em Mannheim. Este projecto é desenhado pelos arquitectos *Mutschler, Langner und Partner*, em aconselhamento e cooperação com Frei Otto e seu Instituto. As suas morfologia e metodologia seriam estudadas e planeadas por intermédio do já referido uso de modelos invertidos. Através destes foi possível controlar as suas complexas forma, curvatura, divisão e a relação destes com as necessidades estruturais do edifício. “*Os modelos form-finding e o desenvolvimento de métodos permitiram estabelecer as formas abobadas, que consistiram numa malha de força igual e contínua realizada com ripas de madeira. Não foi só o desenho da estrutura que foi determinante pelos processos de formação própria na tradução da forma para arquitectura; a montagem desta rede seguiu este princípio também [...]*”.<sup>140</sup> O edifício seria construído de forma modelar e através de gruas, as secções seriam transportadas até à sua área de encaixe. A métrica é construída segundo uma malha de cruzamento de secções de 50 cm entre elas, cobrindo uma superfície com a altura

---

<sup>139</sup> OTTO, Frei; RASCH, Bodo - *Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal*. p.138.

<sup>140</sup> OTTO, Frei; RASCH, Bodo - *Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal*. p.140. [trad. do a.].



↑ Fig.156 Complexo de Governo KOCOMMAS. Esq.: *Majlis al Shura* (Centro de consultadoria); cent.: Escritório do Rei; dir.: Conselho de Ministros.



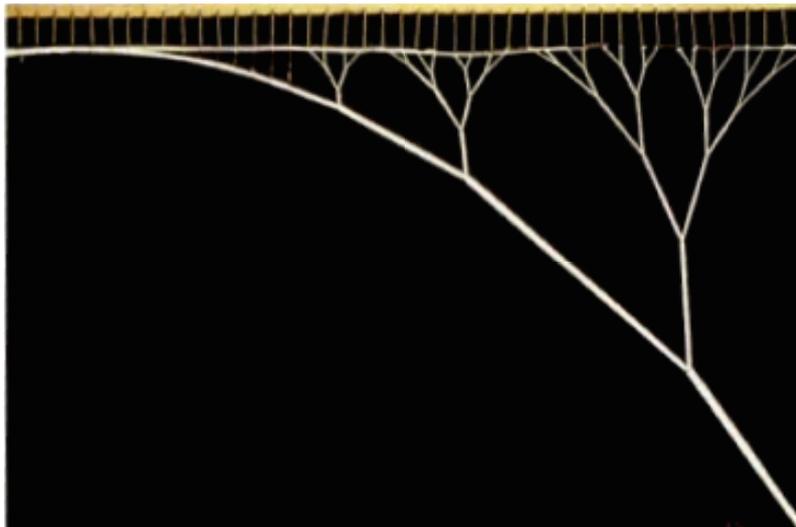
↓ Fig.157 Proposta de uma cúpula de malha hexagonal para o interior dos jardins do Conselho de Ministros. 1979.

máxima de 80 metros e 7,400m<sup>2</sup>, tornando-se numa das maiores *latisse shell* alguma vez construída.

Outro exemplo notável desta tecnologia é o complexo KOCOMMAS de Riyadh, na Arábia Saudita. Este complexo é elaborado segundo uma malha hexagonal realizada com barras metálicas do mesmo comprimento e revestidas de vidro. Este modelo seria fixado através da suspensão do próprio. O seu planeamento emerge mais uma vez dos princípios de auto-formação, resultando numa combinação harmoniosa de duas estruturas metálicas. Embora tenha sido planeado e desenhado até ao último detalhe, nunca chegou a ser executado, devido a políticas de desenvolvimento externas. Outro projecto não executado foi o *Pavilhão alemão* para a *Exposição Mundial de 1992*, em Sevilha. Frei Otto recebe o 2º prémio da competição com um projecto que de certa forma é semelhante à morfologia do *projecto de Mannheim*. Este seria planeado segundo uma malha reticulada de metal revestida em vidro, cujo planeamento implicou o estudo de vários modelos em gesso, arame metálico, madeira, forma e cor.

Outros estudos foram realizados ao longo da carreira de Otto, e também ao longo do programa IL e do Instituto de Estruturas Ligeiras de Stuttgart, explorando os princípios das catenárias, abóbadas e conchas. Vários estudos foram realizados, entre eles edifícios icónicos tais como o *Panteão de Roma*, e a *Colónia Guell* de Antoni Gaudí. Este último foi destruído em 1936 e nunca reconstruído. Embora tenha sido requisitado para a exibição de *Gesamtkunstwerk*, a sua construção permitiu um melhor conhecimento e compreensão da peculiar visão da obra gaudiana. Revelou-se, assim, numa valiosa pesquisa histórica deste fascinante exemplo arquitectónico, ampliando os estudos e informação reunidas pelo IL de Stuttgart.

Estes foram alguns dos exemplos da autoria de Frei Otto e de seus grupos de investigação, os quais contribuíram para um valioso estudo e compreensão do uso de catenárias, abóbadas e conchas morfo-resistentes. Através do uso de analogias, processos de auto-formação e modelos apoiados em princípios básicos de biologia, novas estruturas foram construídas e estudadas. Assim, um novo e valioso legado foi deixado, quer para a Arquitectura, quer para a Engenharia, e que ficou ao dispor dos sucessores até aos dias de hoje.



↖ Fig.158 Estudo ramificado com cabos para calcular desvios mínimos. ↗ Fig.159 Modelo de uma estrutura ramificada.  
→ Fig.160 Estudo de uma treliça ramificada para o projecto da linha de comboio de alta velocidade.  
↓ Fig.161 Exemplo de uma estrutura ramificada na Arquitectura.

#### 2.4.7. Estruturas ramificadas

*“ Em 1960 Frei Otto desenvolveu um recente modelo de estruturas ramificadas em conjunto com os estudantes de Yale. Num modelo suspenso, uma laje foi presa a 64 pontos, que foram unidos vez após vez a diferentes alturas até serem colectadas em quatro conjuntos. Os fios foram enrijecidos e subsequentemente inverteram o modelo.”*

141

Estas estruturas ramificadas são sistemas tridimensionais autoportantes executáveis em aço, madeira e betão. A sua origem é de certa forma antiga e derivam dos primeiros modelos pólos, resultado da carpintaria medieval. Podemos encontrar estes exemplos nos elementos estruturais góticos realizados em alvenaria de pedra.

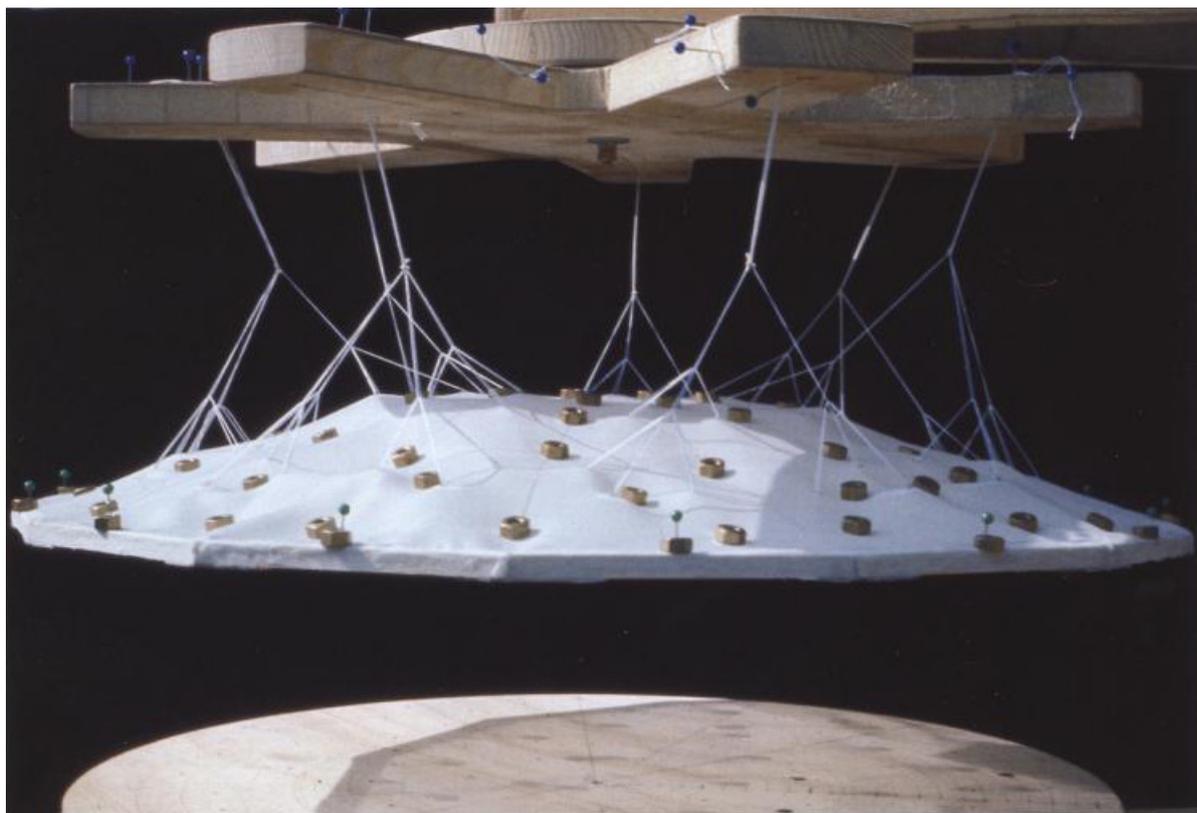
Embora normalmente referidas como colunas-árvore, no entanto o seu comportamento estrutural não se assemelha ao da árvore comum. Enquanto os ramos de uma árvore sofrem uma pressão de dobragem, este tipo de força é evitado nas estruturas de colunas-árvore.<sup>142</sup> O seu princípio básico parte do modelo ramificado das árvores, mas são necessárias modificações estruturais para a utilização como estruturas arquitectónicas. Os elementos individuais devem ser reforçados e rijamente unidos no seu ponto de bifurcação. As cargas devem ser divididas em pequenas porções pela várias ramificações, diminuindo a distribuição das forças exercidas pelo peso suportado. Esta carga, dividida inicialmente pelas suas ramificações, é convergida para um pilar central, cuja “soma” da pressão exercida descarrega posteriormente em fundações individuais. Este tipo de estruturas, único na indústria de estruturas, exhibe assim uma relação particularmente próxima entre o afluimento de forças e a sua forma, com uma estética e funcionamento semelhantes aos elementos naturais ramificados.

Relativamente à estética deste sistema construtivo ramificado é de salientar a respectiva variedade de morfologias. O princípio-base parte da ramificação dos elementos estruturais, embora estes possam adoptar diversas formas. Dotado de uma multifuncionalidade construtiva, este sistema construtivo pode possuir uma natureza mais rígida, estática ou mais orgânica e fluída, desde que o princípio de distribuição de

---

<sup>141</sup> NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p.27. [trad. do a.].

<sup>142</sup> NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p.27.



↑ Fig.162 Modelo suspenso utilizado para calcular a forma da estrutura ramificada do *Majilis al Shura*.  
↓ Fig.163 Estrutura metálica ramificada para o *Majilis al Shura*.

forças seja garantido. Desta maneira, a proximidade entre o construído e a natureza envolvente encontra-se mais próxima do que os elementos estruturais esteticamente artificiais.

Ao longo da sua carreira, Frei Otto desenvolveu diferentes tipologias de estruturas ramificadas para diferentes fins arquitectónicos. Vários estudos foram realizados e diferentes projectos possibilitaram um maior entendimento desta tipologia estrutural, embora nunca tenha materializado essas estruturas. Um dos projectos no qual Otto participou foi o do KOCOMMAS. Novamente através de modelos invertidos, projectou um conjunto de estruturas divididas em pontes pedonais, um hall de conferências e um domo de malha hexagonal que servia de cobertura para o pátio do Conselho de Ministros.

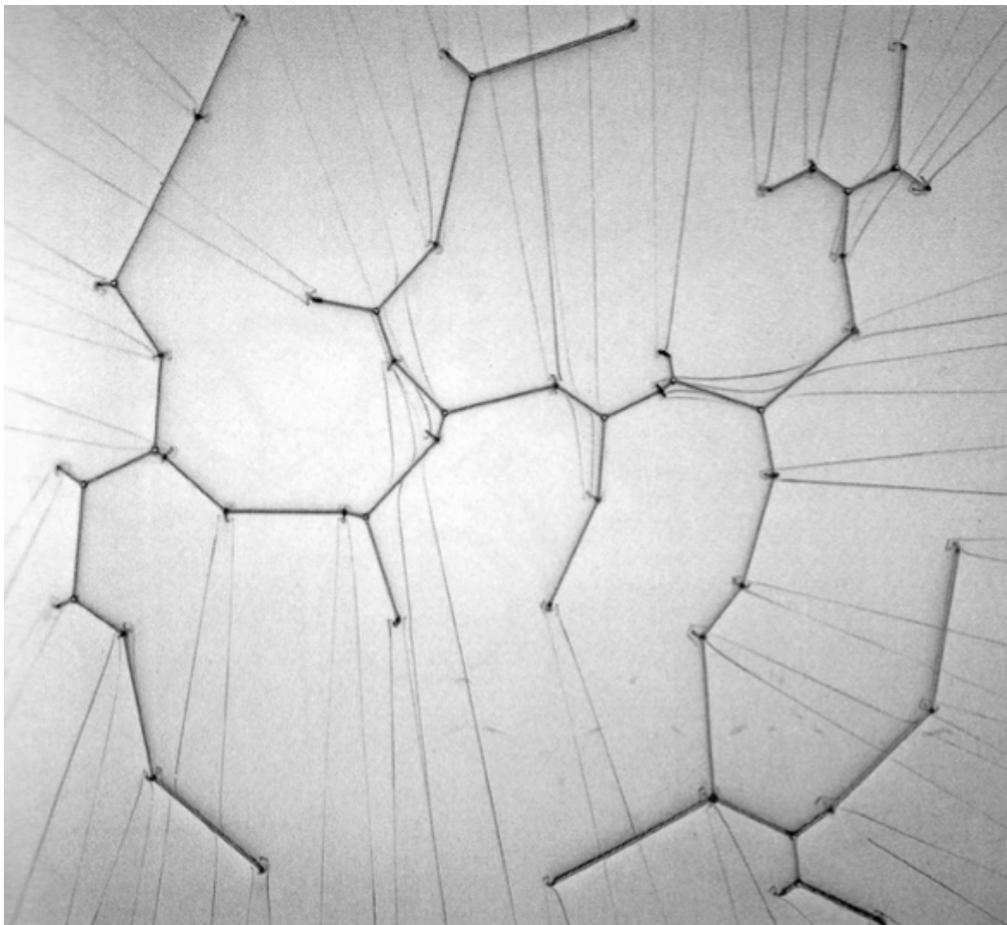
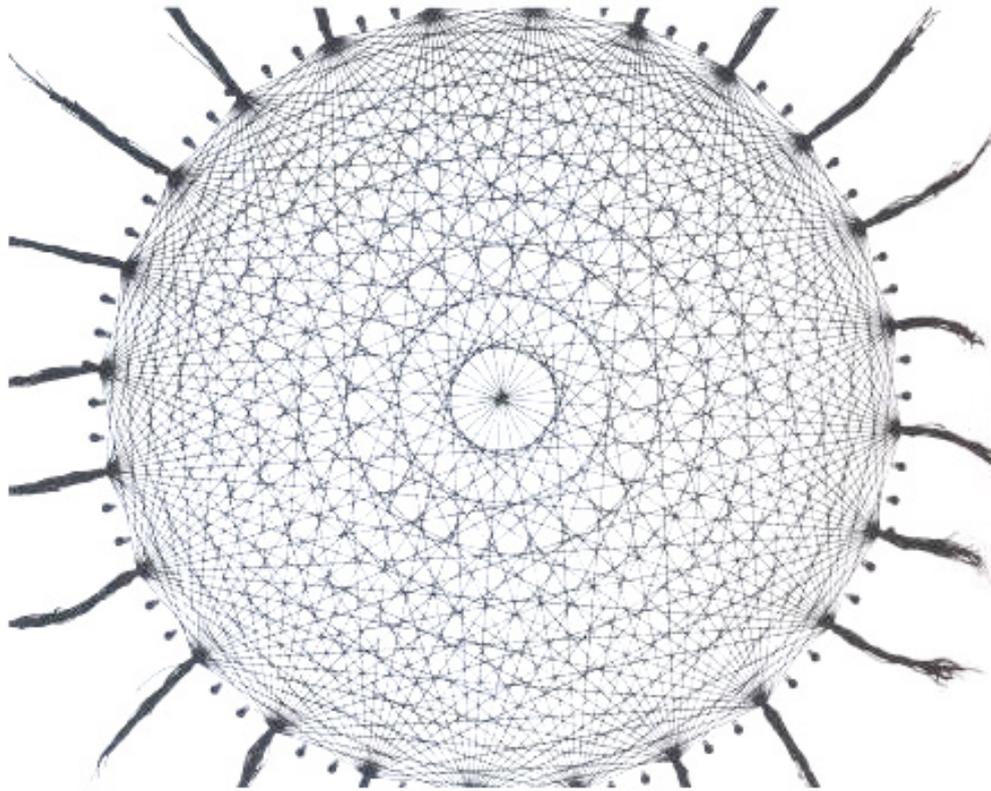
Frei Otto usou uma malha hexagonal neste exemplo, essencialmente por ser “[...] razoável aprender o que ocorre numa malha hexagonal. A maior parte das conchas de celósia da natureza viva são hexagonais, ainda que as quadriláteras são mais fáceis de construir. Com este projecto aprendi a evitar as malhas hexagonais: são muito perigosas e caras porque as uniões requerem um cuidado extraordinário. Carecem de pontos seguros, pois nenhum elemento atravessa-as de forma contínua, como acontece no pavilhão de Mannheim. Nas malhas hexagonais as barras encontram-se umas com as outras, perdendo a continuidade depois da união.”<sup>143</sup>

Em 1991 um novo estudo seria requisitado ao estúdio de Frei Otto. O *Ministério Federal de Pesquisa e Tecnologia* encomendou a elaboração de um estudo ambiental e estético para o desenho de uma nova rede ferroviária magnética da Alemanha. Este projecto seria realizado em cooperação com Sir Edmund Happold of Bath. Foi uma realização que reuniu arquitectos e engenheiros, com a finalidade de resolver as questões estéticas, ecológicas e económicas que um projecto desta dimensão exigia.

Devido às rápidas velocidades atingidas pelo comboio (que variam entre os 400Km/h e 500Km/h) seria necessária uma estrutura com grande capacidade estrutural. Por outro lado, a necessidade de cruzar certas cidades e seu impacto visual implicaria uma estética capaz de se fundir com a sua envolvente de forma harmoniosa. Além disso, a área de ocupação deveria ser a mais reduzida possível, tal como a sua presença no

---

<sup>143</sup> SONGEL, Juan Maria - *Frei Otto. Conversación con Juan Maria Songel*. p.61. [trad. do a.].



↑ Fig.164 Exemplo do exercício de caminhos mínimos. Cada ponto é ligado de forma a criar uma malha radiocêntrica.  
↓ Fig.165 Lamelas de sabão desenham a ligação redutora entre os diversos pontos.

horizonte, pelo que se pretendia uma estrutura leve, mas capaz de cumprir as exigências necessárias.

Assim, foram elaboradas ao todo 10 tipologias diferentes de estruturas ferroviárias, que foram estudadas exaustivamente, avaliando-se qual seria a tripla forma mais rentável – estética, ambiental e económica. As estruturas derivadas deste estudo consistiram predominantemente em estruturas ramificadas de transferência linear de cargas suportadas em pontos individualizados.<sup>144</sup>

Paralelamente e consequentemente ao estudo acima referido, Frei Otto observou vários processos capazes de oferecer este tipo de ramificação na Natureza viva e inerte. Exemplos como os *caminhos mínimos* (através de formas vivas ou de experiências humanas feitas com bolhas de sabão), o estudo de elementos naturais (rios e as suas bifurcações) ou ainda energia eléctrica (a divisão de um raio) são alguns nos quais Frei Otto se inspirou-se para o desenvolvimento deste tipo de estruturas. Deste modo, embora sejam influenciadas por diferentes universos naturais, as estruturas ramificadas e seu estudo estão intrinsecamente ligadas aos modelos e fenómenos presentes na Natureza, em que distintas soluções podem dar respostas às necessidades deste sistema construtivo.

#### 2.4.8. Caminhos mínimos

Os caminhos mínimos ou *minimal path systems* (como Frei Otto designou) foi um exercício de certa forma relacionado com as construções ramificadas. Otto desenvolveu este exercício minimalista em 1958, e aprofundou-o, durante os seus estudos na Universidade de Yale em 1960. Posteriormente, seriam desenvolvidos com maior profundidade em várias fases da sua obra, e também em conjunto com outras parcerias – Marek Kolodziejczyk de Cracóvia no Instituto de Estruturas Ligeiras e o Atelier Warmbronn.<sup>145</sup>

A pertinência deste estudo consiste na conexão de um conjunto de pontos através de uma linha recta, criando um sistema ramificado mínimo. O sistema criado pela união

---

<sup>144</sup> NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p.28.

<sup>145</sup> OTTO, Frei; RASCH, Bodo - *Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal*. p.68.



desses pontos cria um percurso mínimo vantajoso para diferentes finalidades construtivas, tais como os caminhos pedonais, as pistas de bicicletas, as estradas ou os caminhos de ferro. Desta forma, é possível estudar a relação mínima necessária entre a forma, a construção e manutenção da estrutura em causa. Consequentemente, a redução minimalista destes elementos traduz-se numa melhor eficiência energética construtiva, bem como a sua manutenção, e por sua vez, um melhor fluxo quando nos referimos às redes de tráfego.

Este exercício redutor também pode ser aplicado, de forma vantajosa, às construções *latisse* realizadas segundo forças de compressão e flexão, descarregadas posteriormente em barras finas. A convergência deste modelo produz uma ligeira extensão dos sistemas transportados, tal como um uso mais eficiente dos materiais causado pela redução efectiva dos comprimentos e larguras dos vãos livres.<sup>146</sup>

Os caminhos mínimos também podem ser realizados através do uso das películas de sabão. Com apenas os desejados pontos, água, sabão e uma superfície horizontal estável, é possível criar rapidamente uma superfície mínima. Como já foi referido, as películas de sabão reduzem as superfícies à configuração mínima necessária, revelando deste modo o caminho mínimo de criação de uma forma. Este exercício, após a sua criação, era fotografado segundo o aparato criado por Frei Otto.

O acto redutor presente neste exercício revelou o potencial e capacidade de reduzir uma estrutura ao necessário. Assim, mereceu a atenção de Otto, ao longo da sua carreira, sendo capaz de “ensinar” melhores gestões estruturais e materiais, as quais conduziram a uma nova visão, em que a redução formal, material e eficiência energética podem ser apuradas positivamente.

---

<sup>146</sup> OTTO, Frei; RASCH, Bodo - *Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal*. p.68.



## 2.5. Frei Otto e o Virtual

Grande parte da obra de Frei Otto é fundamentada nos processos e técnicas de busca da forma, na maior parte dos casos através da investigação e da criação dos peculiares modelos físicos, que tanto caracterizam a sua obra. Embora estes processos tenham sido predominantemente modelados através do uso físico de modelos, Otto também recorreu ao mundo digital, completando os processos formais com o auxílio da computação e suas “ferramentas”.

É certo que a sua longa carreira antecede o aparecimento do computador, e das tecnologias arquitectónicas deste derivadas; ainda assim, o mundo virtual passou a fazer parte da sua obra. No entanto, e possivelmente pelo seu percurso muito original, a sua proximidade com o mundo virtual difere das maioritárias relações existentes entre a Arquitectura contemporânea e o digital.

Antes da sinergia computacional, e limitado financeiramente, Otto trabalhava segundo uma metodologia desenvolvida pelo próprio. Através dos já mencionados modelos físicos, criou um conjunto de técnicas capaz de traduzir estes modelos para o desenho técnico, possibilitando a sua futura construção. A translação destes modelos para o projecto técnico era realizada através da fotografia e de uma tabela de medições, que permitia medir os modelos com extrema precisão.

*“No inicio, quando tinha pouco dinheiro e trabalhava por conta própria, tinha que trabalhar com fotografias e uma tabela de medições que eu próprio desenvolvi. Com esta configuração conseguia desenhar contornos, que eram exactos até à décima parte de um milímetro.”<sup>147</sup>*

Foi a partir de 1965 que Otto começou a utilizar o computador como gerador de formas arquitectónicas, ferramenta de desenho técnico e análise do comportamento estrutural dos seus projectos. Contudo, a simulação computacional é sugerida, em 1966, pela autoria de Klaus Linkwitz (perito em construções geodésicas), e também da colaboração com John H. Argyris (o inventor dos *finite elements*).<sup>148</sup>

---

<sup>147</sup> “AD : Architectural Design”. London : Wiley Academy. 2004, 74:3. p.23. [trad. do a.].

<sup>148</sup> *idem*.



Linkwitz foi o responsável por introduzir uma nova metodologia capaz de realizar as medições precisas presentes nos modelos Ottianos. Através do estereoscópico, aparato utilizado para medir a superfície da terra, foi possível substituir a metodologia “rudimentar” utilizada por Otto.

Curiosamente, o biólogo Gerhard Helmcke (colega de Otto na Universidade de Stuttgart e figura activa no grupo *Biologie und Bauen*) estaria também a testar o estereoscópico para as medições das diatomáceas e dos radiolários. Helmcke havia colaborado com Konrad Zuse (o inventor do computador) na utilização do computador combinado com o *stereo-comparator* para a fotogrametria das suas investigações.<sup>149</sup>

Este método de medição acabou por ser utilizado no *Pavilhão alemão* na *Exposição Mundial de Montreal*, e do qual fez parte da exposição. Com efeito, o computador de Zuse foi ligado a uma *plotter* de desenho computacional, que foi exibido durante a exposição, imprimindo secções do pavilhão. A partir deste momento, o computador passou a ser uma ferramenta utilizada na obra de Frei Otto. Porém, deve realçar-se que nunca renunciou ao uso dos modelos para a prática arquitectónica.

*“Temos usado o computador desde então, como também continuo a usar os modelos. Os nossos modelos, em combinação com a cálculo interactivo, tem realmente ajudado a fazer edifícios melhores e mais belos. Não sou nada contra os processos digitais, mas enfatizo a importância da compreensão no que estamos fazendo. Resolver problemas com programas de software, que não são especialmente escritos para os problemas particulares que estamos lidando, poderá conduzir para uma falta de compreensão do que é representado no monitor. Qualquer coisa poderá parecer perfeito no monitor, mas não significa que a compreendas, ou que, funcione em tamanho real.”<sup>150</sup>*

Com este pensamento de Otto podemos concluir a sua posição face à fiabilidade do computador, durante o processo de criação de um objecto arquitectónico. Defende que a limitação digital no acto de criar e construir, como a “falsa” confiança depositada

---

<sup>149</sup> “AD : Architectural Design”. London : Wiley Academy. 2004, 74:3. p.23.

<sup>150</sup> “AD : Architectural Design”. London : Wiley Academy. 2004, 74:3.p.23/24. [trad. do a.].



no virtual, poderá influenciar e entorpecer o acto de projectar. Desta forma, salienta a importância do uso de modelos, quer para a criação de formas, quer para o seu cálculo estrutural, embora este deva ser confrontado com as potencialidades computacionais. Isto é: embora sejam infinitas as variantes que o computador oferece, todavia poderão ser consideradas como um obstáculo para o processo criativo; tanto a racionalização computacional como a criação de formas digitais podem de certa forma, limitar e viciar a valiosa e distinta fase criativa presente na prática arquitectónica.

Continuando a linha de pensamento de Otto, o Homem, como arquitecto ou artista, deveria ser capaz de criar formas autónomas das necessidades tecnológicas. Pois, quando nos submetemos ao mundo digital, não as criamos, mas sim encontramos e, por consequência, poderemos encontrar formas desproporcionadas às finalidades da Arquitectura. Nesta conformidade, defende que o computador só é capaz de oferecer o que foi programado, pelo que deverá ser “descartado” como processo de busca da forma.

*“O computador só pode calcular o que já está conceptualmente dentro dele: nos computadores só encontras o que procuras. No entanto, com a experimentação livre podes encontrar o que não se procura.[...] Como arquitecto ou artista posso demonstrar que se pode construir qualquer escultura. [...] quero dizer, não encontro formas, mas sim crio formas. O computador só faz como se tivesse encontrado as formas [...] Trata-se de um grave problema, que a maioria de quem trabalha hoje só com o computador é incapaz de ver, porque pensar em infinitas possibilidades é tremendamente difícil. Pode-se pensar em tudo, pode-se calcular tudo por computador, pode-se dizer que o computador criou esta forma, mas no fundo é mentira, pois quem a criou foi o artista ou matemático que se encontra por detrás do computador.”<sup>151</sup>*

O computador, apesar de ser em grande parte dos casos, uma ferramenta de desenho da Arquitectura, também é utilizado como ferramenta de cálculo estrutural. Relativamente a este delicado assunto, Frei Otto, embora não o rejeite, revela algumas incertezas, devido à sua experiência pessoal e aos recursos e metodologias que utilizou ao longo da sua obra.

---

<sup>151</sup> SONGEL, Juan Maria - *Frei Otto. Conversación con Juan Maria Songel*. p.39/40. [trad. do a.].



Como já foi referido, o pavilhão de Montreal foi o primeiro edifício de Otto construído e calculado com o auxílio do computador. Através deste, foi possível fazer a análise estrutural e estabelecer os valores estruturais necessários, para o sucesso da sua construção. No entanto, o projecto posterior ao Pavilhão alemão – *O Parque Olímpico de Munique* – revelou uma natureza estrutural distinta. Devido à complexidade presente no modelo apresentado, o cálculo estrutural deste projecto resultou num processo misto.

A estrutura da Piscina Olímpica e do *Sport Hall* seguiu a metodologia adoptada pelo Pavilhão de Montreal, enquanto que o cálculo da estrutura do Estádio Olímpico foi conseguido graças à combinação do cálculo por computador com a construção de maquetas.<sup>152</sup>

Frei Otto alerta para a restrição do cálculo estrutural resultante exclusivamente da via computacional, em parte devido à sua experiência pessoal, por ter assistido a alguns casos de fracasso. No caso das coberturas de celosia, Otto já possuiu alguns exemplos (um caso em França e Moscovo e três casos na Alemanha) em que as estruturas, devidamente calculadas e comprovadas pelos os programas computacionais, acabaram por ruir.<sup>153</sup>

Se compararmos estes fracassos, às grandiosas obras do período gótico ou aos magníficos exemplos apresentados por Gaudí - construídos na ausência do cálculo estático e do auxílio do computador - esta importante problemática suscita duvidosas questões quanto à fiabilidade do uso do computador.

Embora todos os edifícios de Frei Otto a partir de 1965 sejam calculados com o computador, acreditamos que não só a sua experiência pessoal de Otto tenha reflectido a sua constante vontade da experimentação física, como também possa ter criado uma relação distinta daquela que a maior parte dos arquitectos da actualidade mantém o computador. Otto, ao contrário de muitos arquitectos, serve-se do mundo virtual para auxiliar e comprovar os resultados obtidos no mundo analógico. Não projecta através do computador, mas sim comprova e ajusta os resultados obtidos segundo os processos, metodologias e modelos que utiliza correntemente.

---

<sup>152</sup> SONGEL, Juan Maria - *Frei Otto. Conversación con Juan Maria Songel*. p.51.

<sup>153</sup> SONGEL, Juan Maria - *Frei Otto. Conversación con Juan Maria Songel*. p.41.



*“Calculo a escultura mediante o computador e adapto as suas dimensões, espessuras ou armaduras de aço no betão ao cálculo estático resultante [...]”<sup>154</sup>*

Estes foram os grupos, os processos e algumas das técnicas estudadas/elaboradas por Frei Otto, quer durante a sua carreira individual, quer ao serviço dos programas de investigação IL, *Biologie und Bauen* e SBF230. Inúmeras publicações surgiram, constituindo os volumes IL a mais vasta destes três grupos. No entanto estas metodologias apresentadas foram as mais relevantes e directamente ligadas à relação aqui estudada entre Arquitectura, Biologia e Frei Otto. Cremos que, através deste estudo, poderemos constatar a possibilidade e o potencial de investigação de soluções biológicas para fins arquitectónicos, que poderão de alguma forma resolver ou facilitar os problemas da Arquitectura. Desde a reprodução total de um sistema natural à sua compreensão ou reprodução parcial de mecanismos, formas e organismos vivos e/ou não-vivos presentes na Natureza, a Arquitectura poderá sempre extrair ensinamentos e ilações de forma positiva. Estes elementos, embora nem sempre necessários para uma boa prática arquitectónica, devem ser tomados em consideração quando novos desafios surgem numa área que continua em constante metamorfose, e em que limites e barreiras são quebrados todos os dias. Limites estes que têm sido ultrapassados segundo um processo constante de evolução, tal como no darwinismo presente na vida terrestre.

---

<sup>154</sup> SONGEL, Juan Maria - *Frei Otto. Conversación con Juan Maria Songel*. p.40. [trad. do a.].



### **III. CASO DE ESTUDO**



↑ Fig.166 Vista aérea do Parque Olímpico de Munique de 1972. Projecto de Frei Otto e *Benisch & Partner*.  
↓ Fig.167 Vista panorâmica do Parque Olímpico de Munique.

### 3.1. Parque Olímpico de Munique

#### Contextualização do modelo Olímpico de Munique

A Alemanha, manchada por duas guerras mundiais, ganhara uma indesejada reputação aos olhos do mundo. As guerras não só destruíram as relações diplomáticas com outros países, mas também os seus território, cidades e infra-estruturas, deixando num sentimento caótico o cenário germânico. A Alemanha, que outrora se revelara como potência mundial, surge nos períodos pós-guerras como um país desmoralizado, destruído e rejeitado pelo mundo. Tentando esquecer a negra fase causada por estes dois ciclos destrutivos, procurou renascer das cinzas hitlerianas e voltar a afirmar-se como a potência que tinha sido.

No período entre as duas guerras, os *Jogos Olímpicos de Berlim* de 1936 constituíram possivelmente um dos poucos eventos internacionais que colocaram a Alemanha no centro do mundo. Volvidos 30 anos, a Alemanha pretendeu recuperar esse protagonismo e também poder revelar ao mundo a imagem de uma nova nação transformada e governada por um modelo edificado sobre novas ideologias. A planificação deste “novo intento” tem início em 1965, quando o presidente Willi Daume sugere Munique como a cidade candidata a receber os Jogos Olímpicos do verão de 1972.

A candidatura de Munique fundamentou-se num novo conceito de cidade olímpica. É apresentado o modelo dos *Olímpicos campestres* - modelo das musas e dos desportos; um modelo olímpico com fácil mobilidade, rejuvenescido, relaxante e despreocupado.<sup>155</sup> Após seis meses, esta candidatura revelar-se-ia vencedora perante os modelos apresentados por Madrid, Detroit e Montreal.

Neste período é de salientar que Munique carecia da falta de infra-estruturas e de complexos desportivos para receber uma competição desta amplitude. A cidade tinha apenas à sua disposição a grande área do aeroporto *Oberwiesenfeld* e o *former parade ground*. Estes factores decidiram a localização dos *Jogos Olímpicos de 1972*, juntamente com a necessidade de lidar com a separação física causada pelos destroços da Segunda Guerra Mundial entre a periferia e o centro urbano. Face aos problemas do modelo

---

<sup>155</sup> NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p.260.



urbano da época, Munique necessitava de novas estratégias e infra-estruturas aptas para a realização da competição internacional.

Após um ano da vitória do modelo olímpico alemão, é lançado o concurso nacional *Competição para os Edifícios e Superfícies dos Jogos Olímpicos XX de Munique no Oberwiesefeld* subsidiado pela *Bavaria e República Federal*. O contrato é assinado a 10 de Julho de 1967 pelo Ministro Federal das Finanças Franz-Josef Strauss e o Major de Munique Hans-Jochen Vogel, de entre outros.<sup>156</sup>

O concurso revelou grande interesse por parte dos arquitectos nacionais, tendo sido apresentadas cerca de cem propostas nacionais. A vencedora foi a equipa do Fritz Auer do atelier *Behnisch & Partners*. No entanto, o projecto vencedor da competição sofreu inúmeras variantes ao longo da sua execução, tanto a nível de projecto como ao nível burocrático. O projecto é hoje reconhecido maioritariamente pela autoria de Frei Otto, que, porém, nessa altura ainda não fazia parte da equipa responsável pela sua construção. Tal como a sua participação “inesperada”, o processo de materialização foi um processo complexo, de avanços e recuos, de intermináveis polémicas, acabando por revelar-se um verdadeiro desafio arquitectónico a todos os níveis.

Esta obra representa, como já referimos, o caso de estudo escolhido para esta dissertação. A escolha foi determinada não só por constituir um dos projectos mais emblemático na obra de Frei Otto, mas sobretudo por ser uma obra que reúne vários dos temas abordados ao longo deste estudo. Um projecto rico nos processos de busca da forma, com uma componente tecnológica em conformidade com os princípios de construção ligeira natural, pelo que indiscutivelmente merece discussão. Dotado de enormes e peculiares avanços tecnológicos para a sua época, grande parte destes feitos construtivos é devido sobretudo graças aos estudos e observações do universo biológico, mas também tecnológico, realizado por o Frei Otto ao longo da sua intensa carreira. Observações que foram sintetizadas nesta dissertação e que se revelaram como elemento central, tanto na execução deste projecto como nos restantes exemplos do seu legado. Com os devidos respetos, acreditamos firmemente que este caso de estudo constitui um elucidativo exemplo dos modelos e crenças que motivaram a singular obra do arquitecto Frei Otto, e que justificam a relação entre Arquitectura e Biologia aqui estudada.

---

<sup>156</sup> NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p.260.



## Projecto do Parque Olímpico de Munique

No dia 13 de Outubro de 1967 é lançado o resultado do concurso nacional de arquitectura do *Parque Olímpico de Munique*. O primeiro prémio desta competição é atribuído à proposta apresentada por *Behnisch & Partner*.<sup>157</sup> Necessário será mencionar que, por esta altura, Frei Otto não havia participado no concurso lançado e a sua participação resultou do desenvolvimento posterior deste projecto.

A proposta apresentada por *Behnisch & Partner* revelava uma vasta superfície coberta por uma construção ligeira, que organizava e cobria a área designada para os *Jogos Olímpicos de Munique*. O projecto consistia essencialmente num conjunto de “estruturas-tenda” suportadas por um número reduzido de pilares estruturais. Teve como principal preocupação criar um tipo de estrutura “natural”, capaz de salientar a sua relação com o conceito de paisagem pretendido pelos seus autores. Desta forma, pretendeu-se criar um modelo capaz de não só salientar os “pontos fortes” da paisagem, mas também de conseguir oferecer as condições e infra-estruturas inerentes às necessidades do modelo olímpico.

A morfologia predominante do projecto apresentado revelava a clara influência do projecto para o pavilhão alemão de Montreal construído por Frei Otto e Rolf Gutbrod em 1967. Através do engenheiro suíço responsável pela proposta, Heinz Isler, foi possível ampliar o conceito utilizado no pavilhão de Montreal para uma área três vezes maior. Embora a proposta apresentada por *Behnisch & Partner* se afigurasse isenta de grandes problemas estruturais, todavia veio a revelar-se um processo exaustivo de discussões e polémicas construtivas pelos entendidos e responsáveis do modelo olímpico.

*“O grande problema deste projecto consiste na construção da cobertura. [...] Por isso, é questionável se a cobertura pode ser realizada segundo estas dimensões e como construção permanente seguidora do modelo «estrutura-tenda» de Montreal. O júri não se encontra capacitado de fazer uma declaração definitiva acerca da viabilidade desta sugestão e, deve por conseguinte, dada a natureza questionável da cobertura proposta, salientar lamentavelmente as suas considerações em relação à segurança necessária, à*

---

<sup>157</sup> NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p.260.



*durabilidade e à operacionalidade deste projecto, que é em todos os aspectos notável.*”<sup>158</sup>

Este processo de dúvidas começou a ser alvo de várias especulações, quer por parte de especialistas, quer pela voz do povo, maioritariamente negativas ao projecto apresentado. Uma das principais figuras que se opuseram à viabilidade deste projecto foi o engenheiro de Estocolmo David Jawerth<sup>159</sup>, que afirmou ser impossível construir o projecto tal como foi apresentado por *Behnisch & Partner*. No entanto, um novo encontro com o professor Fritz Leonhardt da *Technische Hochschule* de Stuttgart, vencedor do terceiro prémio desta competição, juntamente com os professores Burkhardt e Rüschi da *Technische Hochschule* de Munique, levou a reformular a opinião anterior e a afirmarem que a estrutura apresentada não seria impossível de construir confiando um novo horizonte ao projecto. Contudo, afirmaram que a estrutura não fazia sentido do ponto de vista técnico e económico, não só pelas desnecessárias grandes áreas cobertas, como também pelos problemas construtivos perante as necessidades de escoamento de águas, da exposição a cargas causadas pela neve, vento, formação de gelo, holofotes, pelo que, tendo em conta estas variantes, a componente artística do projecto não era suficientemente forte para justificar tal pretensiosismo.<sup>160</sup>

Desta discussão, Leonhardt solicitou a opinião de Frei Otto a 12 de Janeiro de 1968 sobre o projecto em causa.

Mais tarde, no mês de Março do mesmo ano, um novo prazo de três meses é colocado a *Behnisch & Partner* para o desenvolvimento de uma nova solução capaz de resolver os problemas estruturais e económicos e as críticas do projecto, preservando o mesmo conceito vencedor. Durante este prazo *Behnisch & Partner* solicitou a opinião de Leonhardt e Frei Otto. Desta solicitação surgiu finalmente a participação de Frei Otto do projecto olímpico.

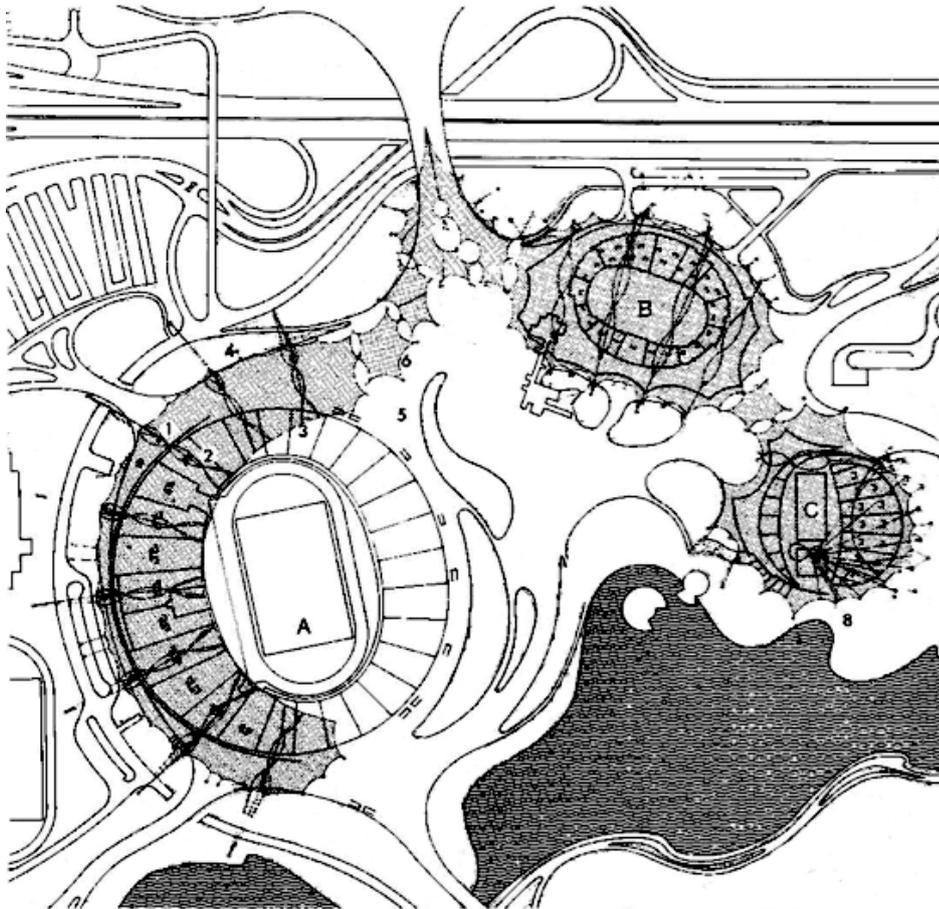
Frei Otto, após vários estudos, desenvolveu uma nova proposta para a estrutura, que seria aceite pelo quadro da *Olympia-Baugesellschaft* (OBG) no dia 21 de Junho de

---

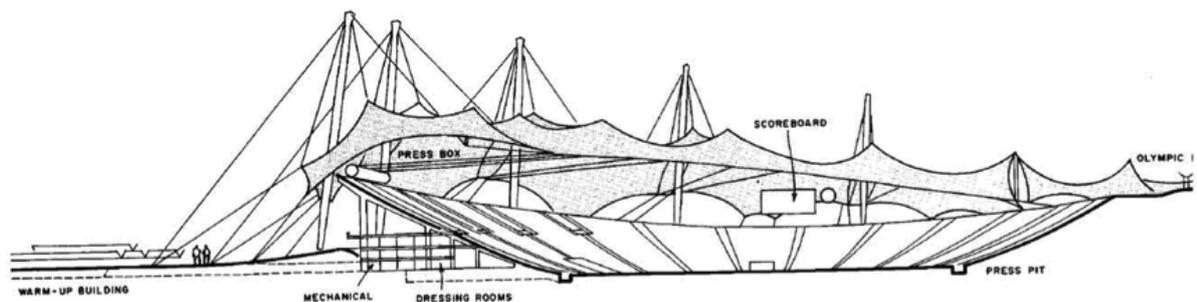
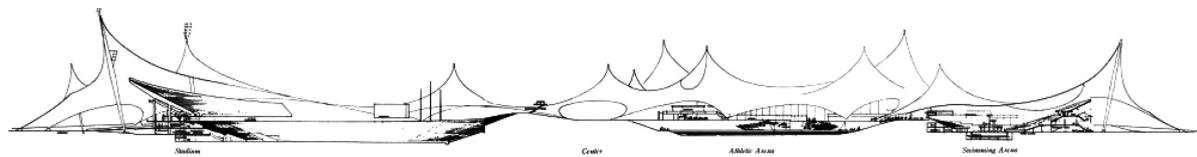
<sup>158</sup> NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p.260. [trad. do a.].

<sup>159</sup> David Jawerth foi o engenheiro sueco responsável por criar a treliça Jawerth. Este sistema construtivo é capaz de cobrir amplos vãos mediante uma estrutura ligeira, obtendo uma substancial redução económica de peso, material e mão de obra.

<sup>160</sup> NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p.267.



A. Estádio Olímpico.  
 B. Sports Hall.  
 C. Piscina Olímpica.



- ↑ Fig.168 Planta de implantação do projecto e suas respectivas áreas.
- Fig.169 Secção longitudinal do projecto.
- ↓ Fig.170 Secção do Estádio Olímpico.

1968. Este modelo, após ser analisado por vários engenheiros internacionais, consagrou o projecto definitivo para o Parque Olímpico de Munique de 1972 e embora posteriormente submetido a mudanças pontuais (em resultado dos cálculos e pormenores construtivos), a solução apresentada por Otto seria a escolhida para a construção.

*“Frei Otto chegou com a solução. A área da cobertura foi dividida num grande número de redes curvas em forma de sela com cabos nas arestas para o suporte e ligação.”*<sup>161</sup>

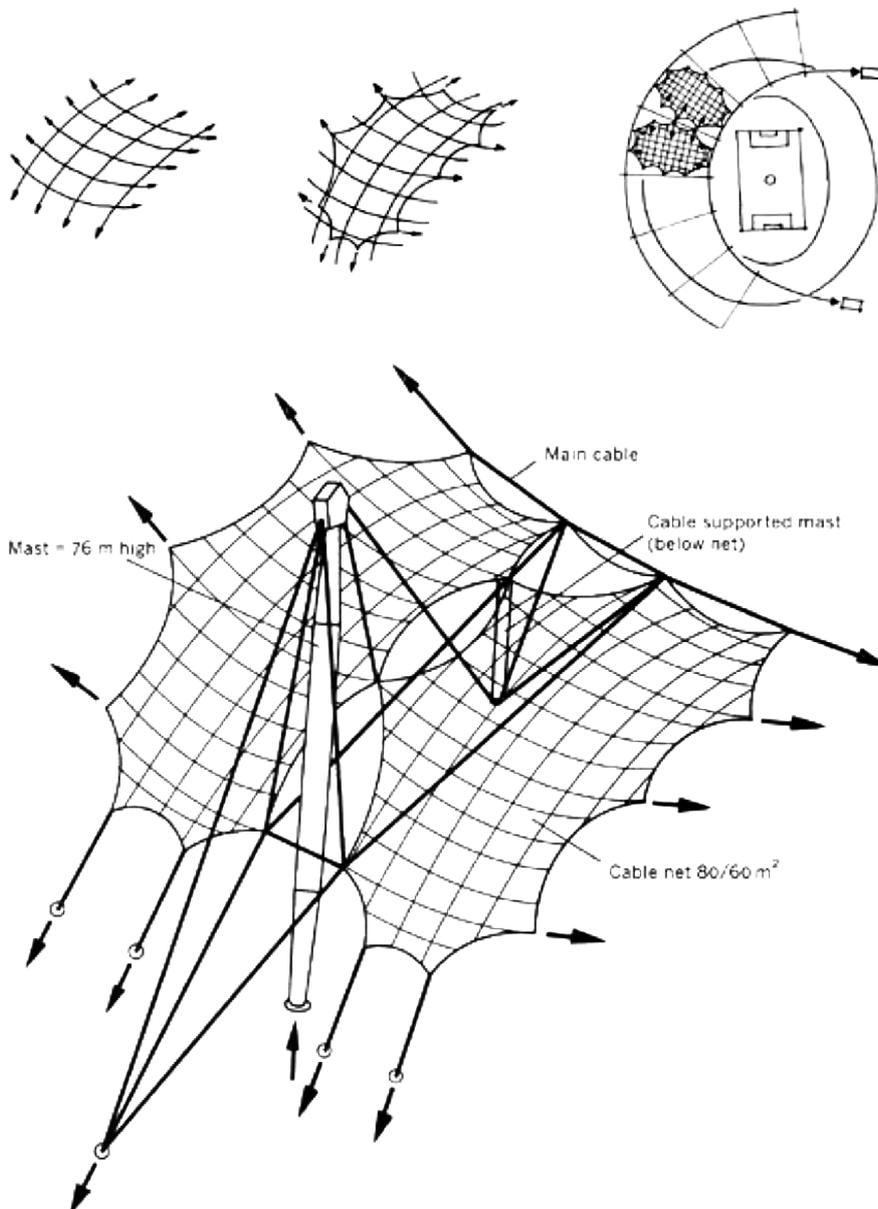
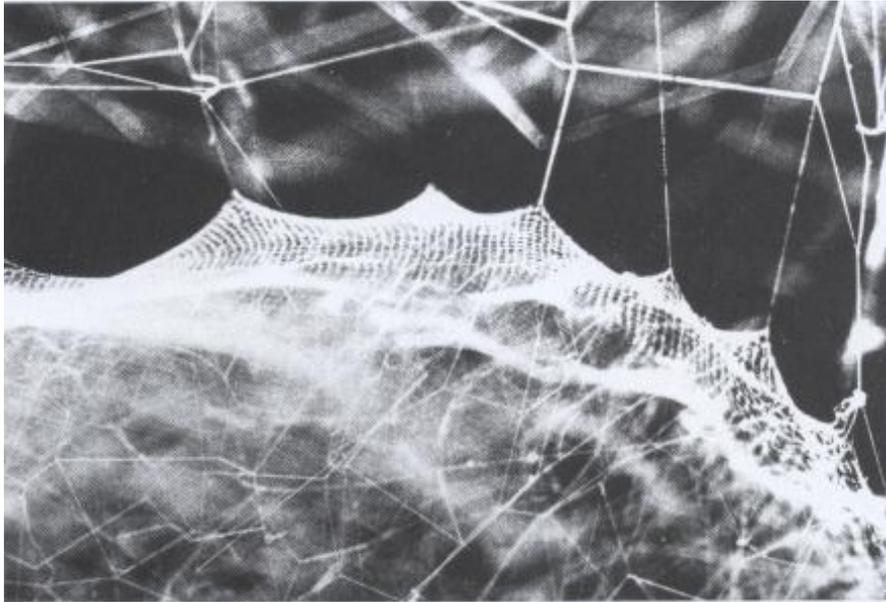
Do ponto de vista programático, o *Parque Olímpico de Munique* é constituído por três áreas principais: o *Estádio Olímpico*, o *Sports Hall* e a *Piscina Olímpica*. A área coberta pelo Estádio Olímpico é de 34,500 m<sup>2</sup>, a do *Sports Hall* de 21,750 m<sup>2</sup> e a da Piscina Olímpica de 11,900 m<sup>2</sup>. As infra-estruturas estão ligadas por uma “rede orgânica” de percursos que se adaptam ao terreno e integram o conceito orgânico das coberturas das principais estruturas. Ao analisar esta rede de percursos, é possível aperceber-se da curta distância entre os diferentes equipamentos e a forma como flui no terreno, oferecendo uma fácil mobilidade e comunicação entre as várias áreas do Parque Olímpico. Ao nível da estética, a superfície artificial confere um carácter unitário à configuração natural das coberturas ligeiras utilizadas.

A implantação do projecto é realizada de forma a criar um percurso contínuo, inter-ligado, capaz de organizar o espaço e criar uma transparência rural – um dos principais pontos requisitados para o modelo olímpico. Esta relação com o terreno revela uma clara intenção de criar um “modelo campestre”, naturalizado, e de certa forma romântico no uso das curvas e formas orgânicas que o projecto ostenta.

O projecto do *Parque Olímpico de Munique*, do ponto de vista biológico, possui uma forte relação com as estruturas naturais produzidas pelas aranhas - as teias. Estes exemplos são dotados de uma grande eficácia tecnológica natural e, por consequência, estrutural. Como já foi referido, esta tipologia de construção natural foi alvo de estudo na carreira de Frei Otto, pelo que foi possível compreender, aperfeiçoar e aplicar este princípio de construção ligeira natural aos sistemas construtivos em rede. O

---

<sup>161</sup> NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p.267. [trad. do a.].



↑ Fig.171 Exemplo biológico do princípio morfológico e estrutural presente nas coberturas do Parque Olímpico.  
 → Fig.172 Esquema elucidativo da distribuição de forças entre as redes de cobertura  
 ↓ Fig.173 Desenho do desempenho estrutural das coberturas e seus pilares portantes.

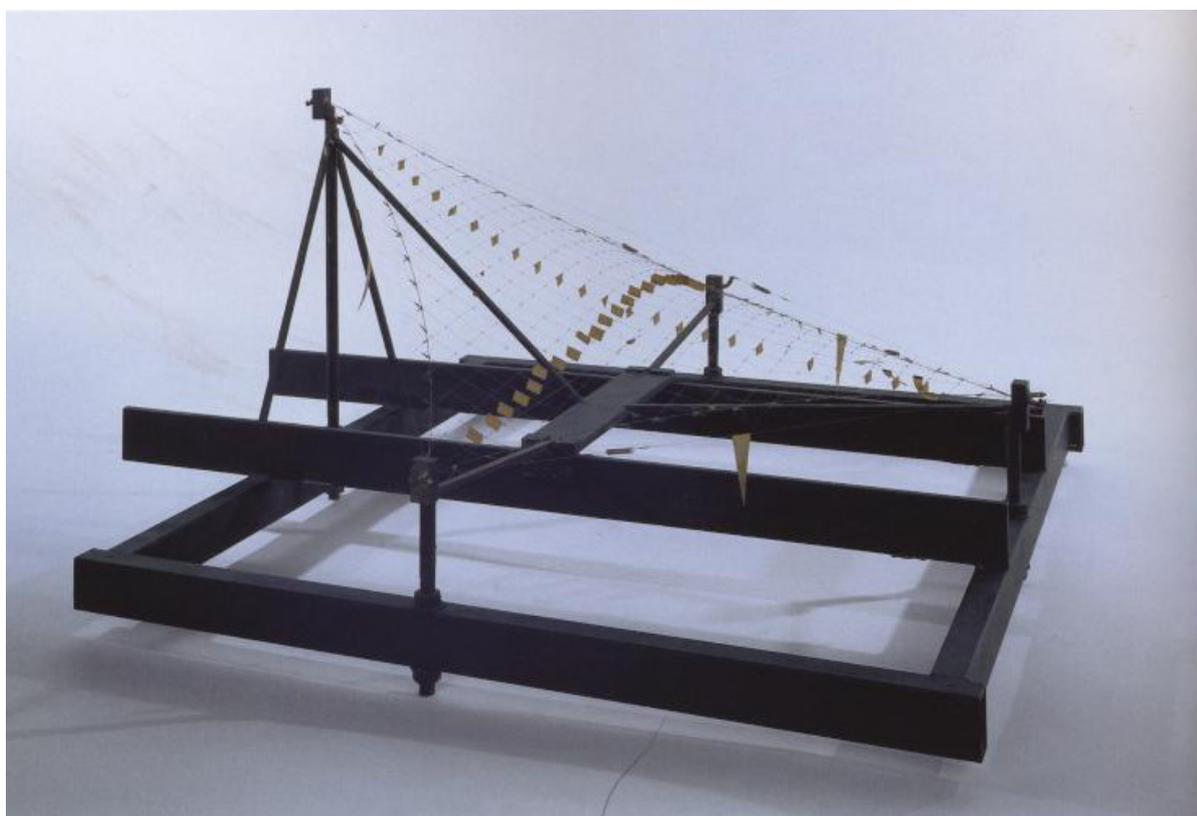
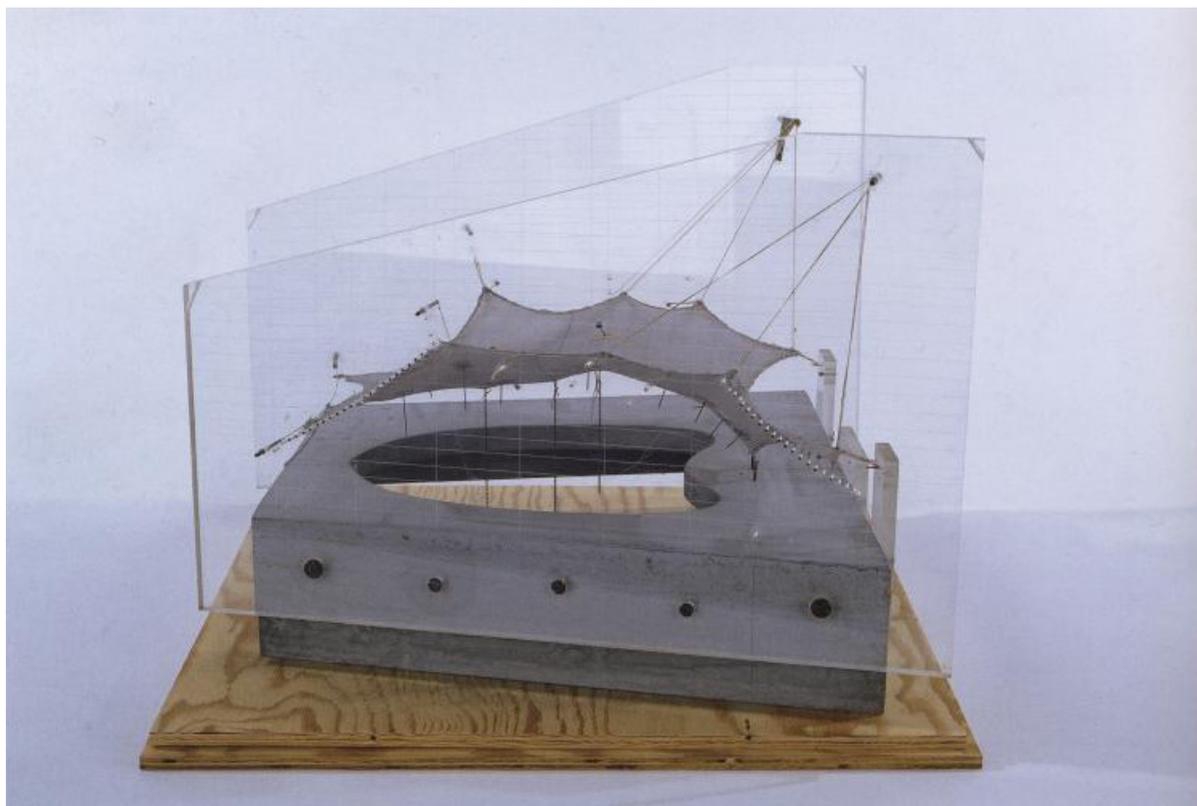
conhecimento obtido do estudo desta área biológica revelou ser a base de todas as estruturas em rede de Otto. As estruturas tênses do modelo olímpico, e o pavilhão de Montreal representam dois objectos arquitectónicos que revelam a compreensão e utilização da tecnologia animal em causa.

Este processo é utilizado em harmonia com o processo análogo presente nesta tecnologia animal. A analogia utilizada neste exemplo parte da forma e configuração das teias de aranha, em que este mecanismo é adaptado às coberturas olímpicas. Se analisarmos estas ao nível morfológico, construtivo e técnico, deparamo-nos com, nada mais nada menos, a construção de uma teia artificial, na qual os elementos que são naturais nas teias – seda, nós e configuração estrutural – são substituídos por elementos artificiais que executam de forma quase idêntica as funções naturais desta.

Deste modo, segundo a classificação de Franco Lodato, podemos classificar este projecto como um projecto biónico entre a imitação completa e parcial. Assim, consideramos o projecto como uma “cópia” da forma e estrutura idêntica ao produto natural (a teia), a qual foi modificada de acordo com as necessidades estruturais e construtivas implícitas neste projecto.

Se analisarmos o comportamento estrutural desta construção ligeira, verificamos que funciona em grande semelhança ao de uma teia. A malha criada pelas aranhas, em grande parte dos casos, é suportada através de segmentos ligados às extremidades da sua estrutura, formando o perímetro da teia. Normalmente, as teias são suspensas pelos filamentos periféricos criados pelas aranhas, que, por sua vez, descarregam as suas forças num elemento mais resistente. Este poderá residir nos ramos de uma árvore ou noutro elemento natural estrutural. Em nosso entender, é possível estabelecer esta analogia, se analisarmos as coberturas olímpicas e o seu sistema estrutural. As coberturas olímpicas compostas por uma malha semelhante à das teias, possuem um perímetro reforçado, que é pré-esforçado. Deste perímetro, foram calculados os pontos de suspensão, que são suportados através dos cabos direccionados às grandes colunas estruturais, que, por sua vez, descarregam as forças exercidas pelas coberturas nas grandes fundações de betão.

Embora o modelo inicial apresentado por *Behnisch & Partner* revele claras influências do pavilhão de Montreal de Otto, a estrutura é visivelmente a reprodução de um elemento natural - a teia. As coberturas olímpicas revelaram-se como um adversário



↑ Fig.174 Modelo de estudo da forma das coberturas do projecto.

↓ Fig.175 Modelo estrutural utilizado para medições da distribuição de forças.

à altura da engenharia, pelo que exigiram várias soluções, análises e cálculo estrutural, com várias reformulações da proposta. Sobre este ponto cremos, que o “auxílio” do conhecimento biológico das estruturas naturais de Frei Otto na aplicação ao exemplo Olímpico constituiria uma verdadeira mais-valia.

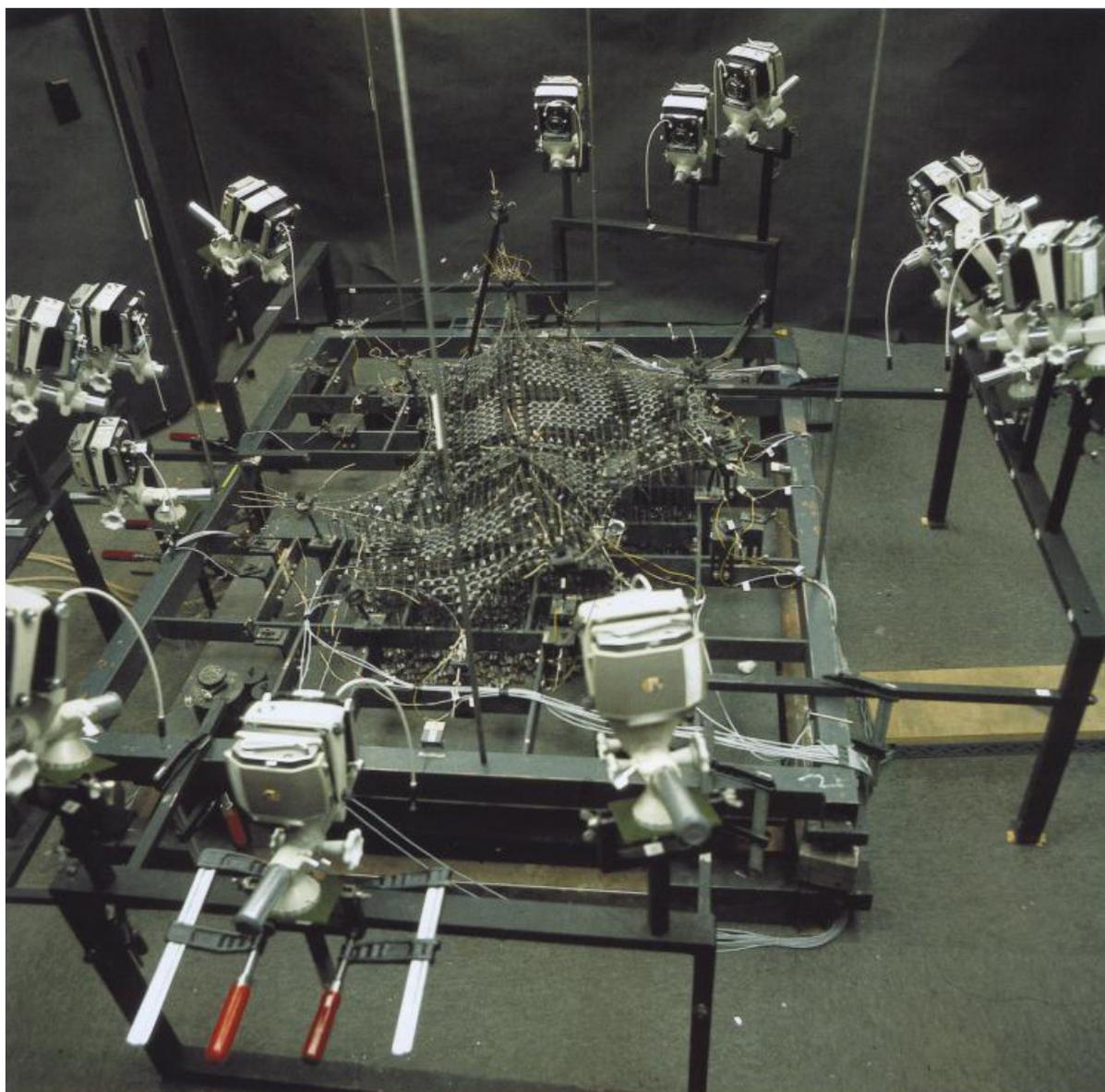
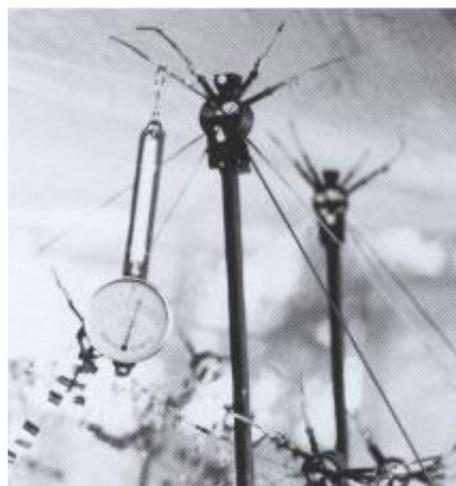
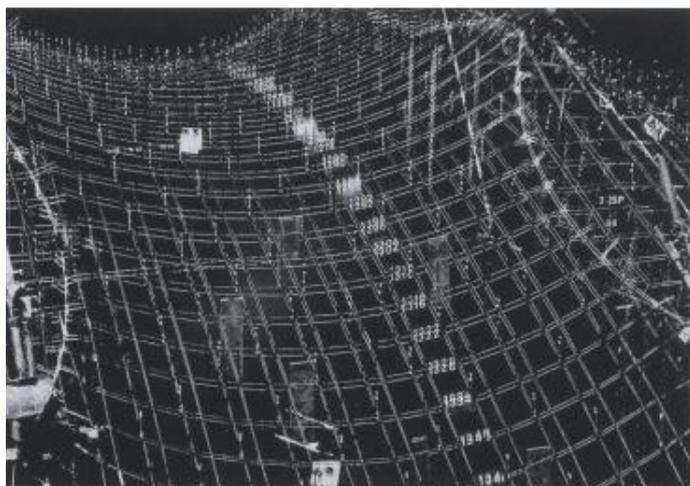
No entanto, o desenvolvimento do projecto foi um exercício constante de experimentação e de tentativa-erro. Frei Otto, juntamente com toda a equipa responsável pela execução do projecto, realizou várias experiências e modelos arquitectónicos no Instituto de Stuttgart (IL), até chegar ao resultado final. Necessário será mencionar a importância das maquetas no desenvolvimento do parque olímpico. Através do já mencionado Caminho Oposto, Otto utilizou a maquete como ferramenta principal para a planificação e cálculo das estruturas em causa. Este processo de retrocesso revelou os elementos-chave para a construção desta estrutura orgânica de dupla-curvatura, designada como parábola hiperbólica.

O recurso a modelos físicos foi imprescindível para aferir vários aspectos do projecto, nomeadamente, a forma, o cálculo e o desenho técnico.

Ao nível da forma, foram efectuados vários exercícios herdados das experiências realizadas no IL-*Instituto de Estruturas Ligeiras*. Modelos de superfícies mínimas em películas de sabão, como malhas de tule, foram criados para compreender as formas pretendidas e possíveis de harmonia com as ambições formais, técnicas e estruturais do projecto.

Relativamente ao cálculo do projecto, foram criados vários modelos de metal (arame), de modo a compreender e calcular o seu desempenho, como a configuração estrutural necessária para este projecto. Foram submetidos a extensos testes estruturais, possibilitando o estudo da distribuição e compressão exercida pela forças estruturais. Assim, foram construídos modelos à escala de 1:125, de acordo com os cálculos preliminares dos engenheiros nas forças das redes. As forças e as medições das tensões foram traduzidas à escala, ou seja, através da conversão dos valores obtidos nos modelos, foi possível chegar aos valores reais subentendidos nas necessidades estruturais.

*"Os modelos foram usados para encontrar a forma dependente do comportamento global de apoio com as tensões superficiais desejadas, as forças de*



↖ Fig.176 Dupla exposição fotográfica utilizada para medições.

↗ Fig.177 Medição das forças exercidas nas extremidades das coberturas.

↓ Fig.178 Modelo de medição fotografado pelo sistema de cameras *Linhof*.

*apoio e de fixação e, as cargas e tensões resultantes destes para os casos de carga-própria da neve e do vento. As forças nos fios das redes individuais (cada quarto cabo foi representado) foram medidas mecanicamente entre dois nós de rede, primeiro com o dispositivo reconstruído de medição de Montreal e mais tarde, com o relógio de medições também desenvolvido no IL por Jürgen Henniscke and Frei Otto.”<sup>162</sup>*

Por fim, ao nível do desenho técnico, estes modelos foram construídos com um rigor minucioso capaz de possibilitar a medição, desenho e planificação deste projecto. Através do registo fotográfico e de várias técnicas de medição precisa, estes modelos foram estudados até à exaustão.

*“Os modelos eram medidos fotometricamente e com a ajuda de um braço de medição tridimensional que gravava a situação espacial das áreas seleccionadas em coordenadas. Usaram-se várias cameras Linhof fixas para tirar fotografias de dupla exposição do estado em carga, e sem carga. A partir destas fotografias, os esforços causados pelas cargas adicionais podiam ser determinados.”<sup>163</sup>*

Um elemento essencial para o registo destes modelos e, por consequência, para o desenho técnico do projecto, foi a introdução de um novo elemento tecnológico – o computador.<sup>164</sup> Frei Otto demonstrou pouca credibilidade neste método computacional, essencialmente pela falta de clareza e tangibilidade relativamente ao método de medição em causa. Assim, atribuiu a responsabilidade estrutural do Hall maioritariamente aos engenheiros responsáveis pelo cálculo do projecto.<sup>165</sup>

Este processo revelar-se-ia a base da planificação do projecto, tanto ao nível da busca da forma, como da sua relação estrutural, tecnológica e material. Através do método experimental, um dos pontos fortes da carreira de Frei Otto, revelou-se a sua potencialidade na arquitectura, salientando a importância do uso de maquetas, dos

---

<sup>162</sup> OTTO, Frei; RASCH, Bodo - *Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal*. p.106/107. [trad. do a.].

<sup>163</sup> *idem*.

<sup>164</sup> Este computador de medição (denominado como *mainframe electronic computer*) surge face à crença de Jörg Schlaich (engenheiro do atelier de Leonhardt ) na falta de rigor dos modelos de medição. Em cooperação com o Instituto de Estáticas e Dinâmicas na Aviação, é desenvolvido um novo método computacional capaz de registar e desenvolver linhas precisas.

<sup>165</sup> NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p. 267.



↑ Fig.179 Entrada do Parque Olímpico de Munique.

estudos e das relações entre a forma, massa e volume, como as técnicas de busca da forma de que tanto fez uso ao longo da sua carreira. Este exercício de investigação realizado por Otto e pelos engenheiros envolvidos no projecto formulou a forte componente técnica de que este projecto é dotado.

Nesta conformidade, as coberturas olímpicas são planificadas segundo os elementos apresentados, essencialmente constituídas por uma rede metálica, suspensa por grandes cabos de aço fixados aos pontuais pilares estruturais e, posteriormente, revestida de acordo com a métrica estabelecida pela malha criada da rede.

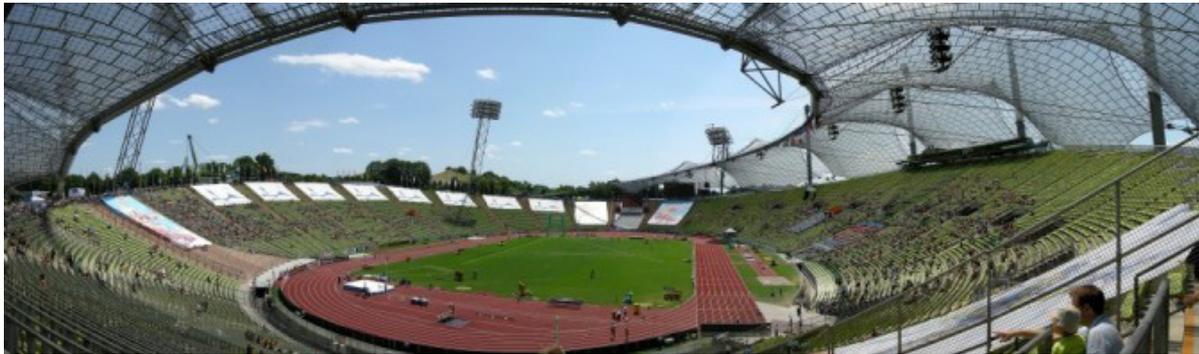
Inicialmente as redes deveriam possuir a métrica de 75 cm recomendada pelos engenheiros, o que implicaria 2.25 vezes mais intersecções do que a métrica sugerida e utilizada por Otto e Gutbrod no pavilhão de Montreal. Pelo aumento das dificuldades da técnica, de execução e do factor económico, foi decidido utilizar uma métrica quadrangular de 50 cm. Dos extensos estudos realizados pelos modelos de cálculo estático foram estabelecidos os valores necessários para os cabos que formavam esta rede. A malha utiliza cabos de aço não torcidos de 11.7mm e, quando necessário, cabos 16.5mm com 19 fios individuais. Ao todo, seria utilizado um total de 436Km de cabos, que são tensionados, conferindo a estabilidade estrutural necessária.<sup>166</sup> A sua união é feita nas intersecções das redes, através de grampos, e posteriormente são unidas pelo o simples acto de aparafusar.

Uma das vantagens deste sistema construtivo residiu na fixação prévia dos grampos nos pontos de união das redes utilizadas nas coberturas olímpicas. O fabricante responsável pelos cabos ficou encarregado de colocar os grampos de união nos respectivos pontos de intersecção. Foi um processo simples, que revelou uma melhor eficiência durante a fase construtiva. Necessário também será salientar que estes grampos de união foram criados e testados pelo Professor Hugo Müller na Universidade de Stuttgart. A sua forma foi otimizada e foram submetidos a uma extensa bateria de testes de resistência, através de longa e constante exposição vibratória.

O revestimento das coberturas também consistiu num processo peculiar no planeamento e execução. Inicialmente, o revestimento deveria ser executado em ripado de madeira, painéis ligeiros pré-fabricados de betão ou folhas de PVC. No entanto as coberturas acabariam por ser revestidas com acrílico transparente, o qual seria pré-

---

<sup>166</sup> NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*.



↑ Fig.180 Redes de cobertura e revestimento em acrílico transparente.  
→ Fig.181 Vista panorâmica do Estádio Olímpico.  
↓ Fig.182 Vista do lago e sua envolvente.

esticado, moldando-se às métricas propostas pelas malhas das redes. Esta escolha residiu na necessidade de criar uma transparência desejável face às precisões da nova tecnologia - a transmissão televisiva a cores.

A emissão a cores que tinha transmitido os *Jogos Olímpicos de 1968* no México seria a mesma emissão utilizada nos Jogos Olímpicos de Munique. Embora fosse uma grande novidade tecnológica, ainda era limitada e curiosamente acabou por decidir a escolha do revestimento das estruturas-tenda. A limitação desta nova tecnologia residia na lenta resposta face à luz e sombra durante a captação de imagem. Tecnologia esta que possui um *delay* de dez segundos e, face aos 100m de vão apresentados pelas coberturas, o factor sombra constituiria um problema para a captação de imagem. Assim, foi escolhido o revestimento acrílico, permitindo a transparência desejada para uma boa transmissão televisiva.<sup>167</sup>

Frei Otto desenvolveu um sistema capaz de fixar estes painéis acrílicos às redes das coberturas, através do uso de dispositivos de fixação desenhados por ele próprio. Desta forma, os painéis acrílicos foram fixados de forma quase imperceptível do ponto de vista do observador, melhorando substancialmente a estética das coberturas.

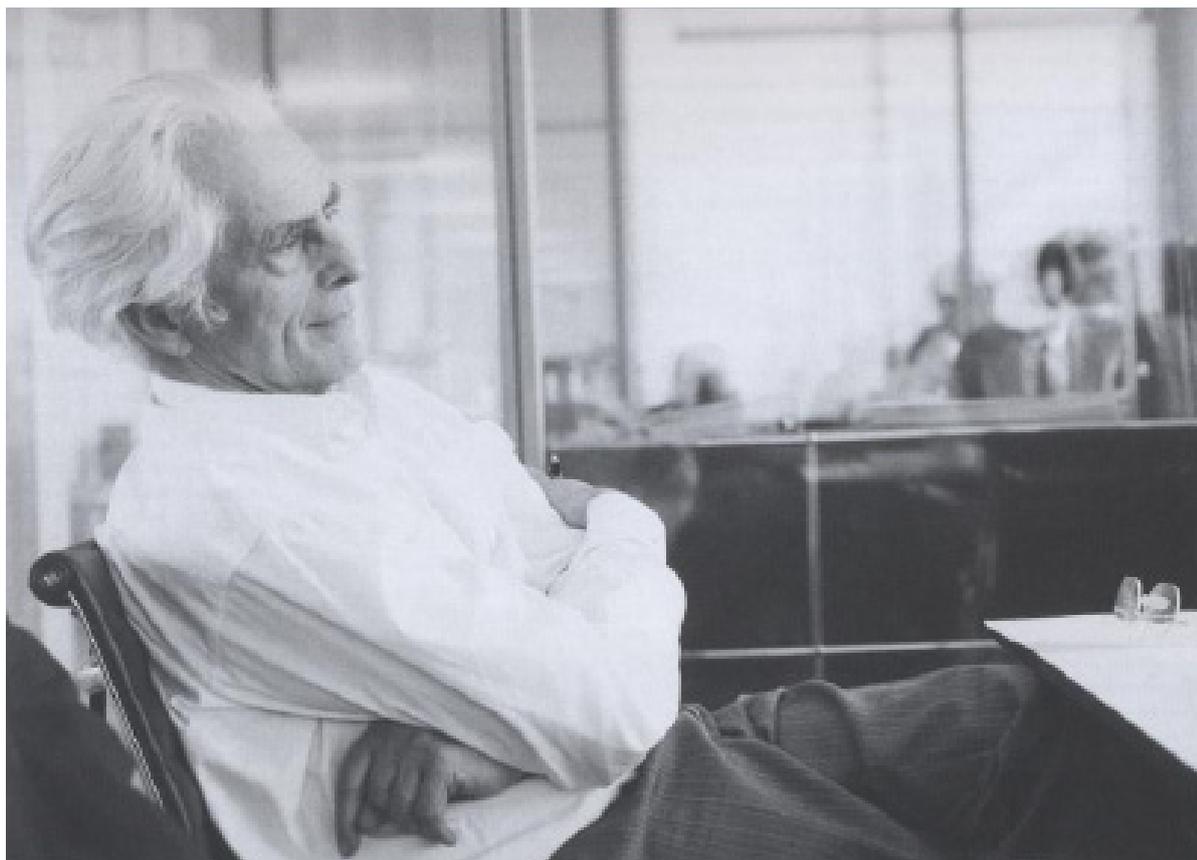
O projecto do Parque Olímpico de Munique foi, assim, caracterizado por um longo processo formal e construtivo. Teve início a 9 de Junho de 1969, as coberturas foram pré-esforçadas a 4 de Novembro de 1971, a última folha do revestimento de acrílico colocada a 21 de Abril de 1971 e os Jogos Olímpicos tiveram início a 26 de Agosto de 1972.

Este projecto constituiu um desafio à altura da tecnologia construtiva da sua época, tal como aos elementos responsáveis pelo seu planeamento e construção. Foi um exercício contínuo de experimentação, de mutação de técnicas e de processos construtivos, que tornaram possível erguer este projecto ambicioso. Acreditamos, que as técnicas, a forte componente experimental e o conhecimento de soluções e processos biológicos de Otto, revelaram-se um elemento-chave para a sua construção e, por isso cremos firmemente que este projecto representa o melhor exemplo para sintetizar a obra e investigações realizadas por Frei Otto ao longo da carreira.

Reconhecido como uma das melhores construções alemã, o *Parque Olímpico de Munique* constitui um exemplo arquitectónico intemporal que, decorridos 40 anos,

---

<sup>167</sup> NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p.269.



↑ Fig.183 Frei Otto no escritório de *Ingenhoven und Partner*. 2000.

revela qualidades arquitectónicas muito actuais. Ainda assim, e segundo Otto, o *Parque Olímpico de Munique* possui alguns pontos contrários à sua visão arquitectónica. Embora construído segundo o princípio de construção ligeira, todavia esta foi deturpada por sentimentos de ambição e grandiosidade, na medida em que as capacidades redutoras de materiais construtivos que as construções ligeiras possuem não foram utilizadas da melhor forma, traduzindo-se numa “prejudicial” gestão menos eficaz dos recursos materiais.

Na sequência deste raciocínio, deve-se salientar que o edifício não foi planeado em conformidade com as necessárias decisões técnicas, mas antes segundo uma tentativa grandiosa de demonstrar e explorar as habilidades reunidas pelos engenheiros e arquitectos responsáveis.<sup>168</sup>

Embora possua alguns pontos contrários à doutrina Ottiana, este magnífico exemplo arquitectónico revela um notável feito do colectivo responsável, bem como da tecnologia implícita na sua construção e cujo expressa diversas revelações relevantes: desde a importância na arquitectura do processo de tentativa-erro, até à exploração de metodologias experimentais, ao uso de modelos físicos, ao estudo e reunião de conhecimentos provenientes de outras áreas (neste caso das tecnologias e soluções presentes na Natureza) e, acima de tudo, à crença inabalável de que, mesmo perante desafios considerados inexequíveis, existe sempre a possibilidade de contorná-los e construir o impossível.

---

<sup>168</sup> NERDINGER, Winfred (ed.) - *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. p.269.



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na actualidade, o exercício da Arquitectura exige uma multidisciplinaridade sem precedentes, sendo regulada por um amplo e diversificado conjunto de valores, conhecimentos, metodologias e ferramentas à sua disposição. Este carácter multidisciplinar acentua a necessidade de se reconsiderar o potencial uso de sinergias entre diferentes áreas, questionando o limite das fronteiras da disciplina e das suas componentes artística, científica e tecnológica.

A Arte, a Ciência e a Tecnologia são três valências/dimensões associados à prática da Arquitectura que, naturalmente, configuram a concepção e materialização dos objectos arquitectónicos. Acompanhando a componente científica pode-se realçar o papel da Biologia, apresentado como tema central desta dissertação na medida em que permite sustentar uma perspectiva arquitectónica fundamentada nos princípios universais da Natureza.

Através do estudo realizado e a título de reflexão, concluímos que a versatilidade da Natureza em criar soluções eficientes poderá revelar-se como processo inspirador para o arquitecto, pelo que merece uma atenção particular nos dias de hoje. Através da referência a exemplos encontrados ao longo da História da Humanidade, comprovámos no capítulo *Arquitectura e Biologia* como a capacidade generativa dos sistemas naturais tem servido de inspiração e inovação para responder a problemas presentes em diferentes áreas científicas e, naturalmente também na Arquitectura. Recordemos como exemplos, as sofisticadas invenções renascentistas de Leonardo da Vinci, as construções e biomorfismos de Antoni Gaudí, as cúpulas geodésicas de Buckminster Fuller ou as experiências e projectos realizados por Frei Otto.

Observámos que na Arquitectura, tal como na Biologia, as relações geométricas entre a forma e função encontram-se intrinsecamente ligadas. Contudo, o processo criativo e a individualidade humana presentes na Arquitectura poderão distorcer o equilíbrio entre estas duas proeminentes componentes. Assim, acreditamos que através da observação e da compreensão da Natureza, poderemos aprofundar a coerência e o desejado equilíbrio entre forma e função, pela conversão de princípios biológicos



válidos, capazes de gerir esta relação intrínseca. Para este efeito, será necessário extrapolar os processos generativos e reguladores das soluções biológicas por intermédio do processo análogo, o qual ganha um destaque crucial na sua adaptação à Arquitectura.

Concluimos que o uso de analogias constitui um exercício elementar na transição de soluções biológicas para fins arquitectónicos, na medida em que podem oferecer uma racionalidade alternativa, potencialmente determinante na escolha de decisões durante o processo criativo. Não obstante, a Natureza como fonte de inspiração ao processo análogo é vasta, complexa e constituída por uma colossal diversidade biológica de processos e de relações entre a vida e o meio ambiente. Diferentes organismos, escalas, formas, funções ou materiais fazem parte desta complexidade natural, pelo que afirmamos a necessidade de um conhecimento universal e multidisciplinar de diferentes ciências naturais para a identificação ou segregação viável de analogias biológicas.

Também constatámos um aumento da complexidade de processos e relações geométricas na Natureza viva, ao invés da Natureza inerte, dos organismos microscópicos e dos organismos unicelulares. A simplificação presente nestes últimos exemplos poderá revelar-se uma vantagem, pelo que devem ser reconsiderados, uma vez que um maior grau de simplificação poderá facilitar o processo análogo de conversão em diferentes áreas, como a Engenharia, o Design ou a Arquitectura. Contudo, assim como a Natureza inerte não deve ser ignorada ao nível biológico, também não o deve ser ao nível arquitectónico, pois constitui tanto um factor influente nos processos generativos da vida como na morfogénese de formas válidas para Arquitectura.

Nesta reflexão, podemos concluir a progressiva incerteza de definir e/ou separar o vivo do inerte, dada a correspondência existente entre os vários elementos e os processos responsáveis pela Biosfera. Consequentemente, a Biologia, como ciência aberta e progressiva, tem revelado uma reformulação dos seus princípios e das suas investigações, demonstrando que os processos e os resultados da Natureza inerte desempenham o mesmo grau de relevância e que a relação entre o vivo, o inerte e os seus processos completam o significado de Biosfera. O mesmo princípio aplica-se à



Arquitectura, quando falamos de analogias biológicas, não só pela “facilidade” que a Natureza inerte contrapõe à complexidade dos organismos, como pela inigualável diversidade, importância e potencial que oferece.

Contrapondo a complexidade unânime presente na Biologia, observámos no primeiro capítulo que a eficiência energética e material dos seres vivos surge geralmente segundo uma orientação simplicista. A Natureza encontra-se em constante competição pelas principais fontes de energia – o Sol e o Planeta; no entanto, a limitação energética de que os organismos são possuidores provoca uma gestão primordial dos seus recursos e dos seus processos. Esta necessidade incontornável de sobrevivência implica uma maior optimização entre a forma, a função, a matéria e a energia utilizada, conduzindo a uma relação equilibrada entre todas estas variáveis.

Deste modo, segundo os princípios biológicos de optimização e de eficiência material e energética das estruturas naturais, podemos atingir uma melhor gestão destas componentes na Arquitectura. A compreensão e aplicação de princípios biológicos optimizados poderão informar a gestão formal, estrutural e material na Arquitectura, possibilitando uma construção mais eficiente e sustentável. Contudo, a extrapolação destes princípios para a Arquitectura deverá ter em consideração as qualidades específicas dos materiais, das técnicas construtivas e das ferramentas utilizadas durante o processo de investigação, de modelação e de comprovação.

Ao longo dos últimos 40 anos, a Informática tem vindo progressivamente a destacar-se neste processo de análise, de modelação e de comprovação, como ferramenta auxiliar na conversão de analogias biológicas para a Arquitectura, permitindo não só expressar a complexidade dos desenhos naturais em resultados arquitectónicos, mas também comprovar a viabilidade destes aos níveis estrutural e material. Igualmente deverá realçar-se a importância da Informática e da Cibernética como campos de interacção com o meio, na geração de simulações biológicas controladas pelo ser humano. Apoiadas nos princípios generativos do mundo natural, a informática e a Cibernética facultam múltiplas ferramentas tecnológicas capazes de traduzir os comportamentos e processos biológicos dos seres vivos em resultados tecnológicos.

Entre as várias ramificações tecnológicas, destacam-se os processos de carácter generativo para a simulação tecnológica de comportamentos biológicos e de resultados



arquitectónicos. Esta capacidade generativa da Informática implica, na sua génese, a biomimese dos conceitos biológicos de emergência, morfogénese e auto-organização. Segundo estes conceitos complexos, é possível aprofundar e simular o conhecimento relativamente às qualidades generativas, organizacionais e “sociais” dos organismos de modo a informar a concepção arquitectónica baseada na capacidade auto-organizativa da Natureza. Nesta sequência, concluímos que, através do estudo de padrões, comportamentos e ordens biológicas, será possível conquistar um conjunto válido de valores aptos para a capacidade organizacional da Arquitectura e uma melhor compreensão dos processos de criação e selecção, inerentes ao processo criativo do arquitecto.

Todavia, apesar deste potencial, a aplicação da Informática e das suas ferramentas virtuais de desenho na “arquitectura biológica” é relativamente recente. Fundamentadas numa racionalidade experimental, as investigações anteriores ao computador eram predominantemente realizadas através de modelos e experiências analógicas. É neste campo que devemos destacar a obra de Frei Otto, a qual revela como a investigação experimental é capaz de assistir positivamente a prática arquitectónica.

Ao estudá-lo, concluímos que os modelos físicos por ele utilizados transcendem as convencionais necessidades de representação do projecto. Na verdade, os modelos de realizados por Frei Otto constituem uma ferramenta crucial para os processos de busca da forma, para a percepção e optimização da relação entre forma, força e massa ou para a recriação de soluções e tecnologias biológicas. As experiências realizadas com películas de sabão para encontrar superfícies mínimas, as maquetas de gesso, redes e correntes capazes de descrever as formas e catenárias necessárias para a construção de arcos, abóbadas e conchas morfo-resistentes, os modelos pneumáticos e borbulhas de sabão para o estudo de estruturas pneumáticas e hidráulicas, o acto redutor dos caminhos mínimos ou a capacidade estrutural apresentada pelas estruturas ramificadas, foram algumas das experiências realizadas por Otto bem elucidativas de como o desenho arquitectónico deve ser consequência das investigações, das relações e dos resultados obtidos durante o processo experimental de busca de formas arquitectónicas.



*“Esta consideração da forma como resultado de um processo de busca oferece um ponto de conexão com os objectivos primogénitos das vanguardas arquitectónicas da década de 1920. Não é em vão que o próprio Walter Gropius considerava Frei Otto como um continuador dos seus princípios fundamentais, um autêntico sucessor da filosofia e da metodologia que inspirou a fundação da Bauhaus, pois não parte das abordagens formais prévias, nem considera a forma como um «à priori», mas sim como a consequência de um processo de busca.”<sup>170</sup>*

De acordo com esta reflexão, concluímos que a sistematização da forma arquitectónica revelou-se um exercício central na obra de Frei Otto. Numa racionalização lógico-dedutiva, Otto procura estabelecer os critérios, os métodos e as técnicas capazes de traduzir e reduzir à sua essência a “morfo-lógica” arquitectónica e estrutural dos seus objectos. Ou seja, deparamo-nos com a presença contínua de um processo colector e generativo de formas, cujos objectivos consistem claramente em proporcionar regras arquitectónicas de ordem inteligível, de classificação ordenada ou de sistematização morfológica, capazes de vencer, isolar e inovar as adversidades formais e funcionais na Arquitectura.

Das diferentes metodologias de optimização e de criação de formas arquitectónicas realizadas por Frei Otto, devem-se destacar os preciosismos das técnicas de busca da forma, do Caminho Oposto e das suas relações com a Natureza. As técnicas de *form finding*, fundamentadas nos princípios generativos de auto-formação da Natureza, revelam um valioso estudo de relações morfológicas entre a Natureza, a forma e a Arquitectura. Neste sentido observámos que este conjunto de técnicas analisa, experimenta e reúne as qualidades construtivas biológicas, permitindo à *posteriori* a sua conversão para a Arquitectura. No entanto, a génese morfológica dos exemplos biológicos estudados por vezes revela-se impenetrável, pelo que exige uma distinta aproximação a este estudo. Face a esta problemática, constatámos a importância do exercício do Caminho Oposto como solução das adversidades presentes no processo de busca da forma. Este exercício de caminho inverso parte do geral para o singular, do complexo para o simples, e numa investigação de “cima para baixo”, define

---

<sup>170</sup> SONGEL, Juan Maria - *Frei Otto. Conversación con Juan Maria Songel*. p.92. [trad. do a.].



uma clarificação progressiva da morfologia, desde a forma final aos princípios responsáveis pela sua génese.

Pelo estudo destas técnicas, concluímos uma progressiva desmistificação dos princípios influentes/elementares na morfologia arquitectónica que questionam a essência e a finalidade da forma na Arquitectura. Deverá a forma ser algo de belo na Arquitectura? Que motivos devem reger a forma? Quais são os princípios válidos para o sucesso da forma arquitectónica?

São algumas das questões difíceis de responder. No entanto, constatámos que esta análise empírica de relações morfológicas poderá auxiliar à pontual arbitrariedade morfológica sentida nos manifestos da Arquitectura moderna, em que valores classificados mediante os conformismos académicos, artísticos ou pessoais, podem aportar falsos valores, despropositados às necessidades do ser humano e, conseqüentemente, das suas manifestações primordiais na Arquitectura.

Segundo os mesmos princípios de optimização da forma, também constatámos a constante preocupação de Otto com a eficiência estrutural, material e ambiental dos seus projectos. A construção ligeira e as superfícies mínimas constituem grande parte da sua obra, revelando claramente a intenção de reunir geometrias, relações estruturais e relações materiais, de forma a reduzir a Arquitectura ao essencial. Através das medições e comparações entre a forma, a força e a massa, concluímos que as relações de sustentabilidade e eficiência construtiva na Arquitectura podem ser ampliadas, reduzindo substancialmente o consumo de meios, materiais, energia e gasto económico. Assim, será possível optimizar a relação entre estas componentes e estabelecer uma relação equilibrada com o meio ambiente, combatendo o uso excessivo de matérias e a obsolescência de determinados equipamentos urbanos. Não obstante, não defendemos que a Arquitectura deva seguir a actual obsolescência sentida em grande parte dos produtos tecnológicos humanos, mas sim defendemos a capacidade generativa, redutora e reciclável que os objectos arquitectónicos devem possuir, combatendo o “lixo arquitectónico” ou os “espaços mortos” das urbes, responsáveis pela negação evolutiva e adaptativa de novos espaços urbanos.

Em complemento às metodologias já referidas, concluímos que a capacidade interdisciplinar de Frei Otto aproxima-o dos campos da Engenharia, da Biologia e da experimentação, pelo que será válido descrevê-lo como arquitecto, como engenheiro ou



inclusive como inventor. O seu percurso e a participação activa em diferentes programas e grupos de investigação (dos quais salientamos o grupo *Biologie und Bauen*, possivelmente o grupo de investigação multidisciplinar mais notável da sua época), revelaram-se como “elementos-chave” para a compreensão da sua peculiar obra e metodologia experimental. Neste processo multidisciplinar, Otto estabeleceu contacto com diferentes conhecimentos nas áreas da Biologia, da Engenharia, da Antropologia, da Paleontologia, da Física, da Filosofia, da Geodésica ou da História e aplicou-os beneficemente e sem precedentes à Arquitectura. Desta forma, podemos concluir que a multidisciplinaridade não só amparou a obtenção de resultados arquitectónicos inovadores, mas também complementou e combateu uma certa individualidade que convencionalmente caracteriza a Arquitectura. Por outro lado, a experimentação realizada nos grupos de investigação revelaram o potencial desta metodologia na criação, investigação e comprovação de resultados arquitectónicos.

Na actualidade, a Arquitectura tem integrado, progressivamente na sua prática de projecto, instrumentos e processos digitais. Através das tecnologias computacionais emergem novas possibilidades analíticas, metodológicas e criativas. A exploração de processos de CAD/CAM<sup>171</sup>, por exemplo, permite uma interacção entre os meios digital e material, que conduzem à expansão de possibilidades de investigação entre experiências analógicas e virtuais, aproximando-as.

Inserido neste contexto, a obra de Frei Otto demonstra que a prática arquitectónica pode integrar uma forte componente experimental analógica e que não deverá ser minorizada pelo facto de se utilizarem tecnologias digitais. Ao invés, através destes processos, novas sinergias poderão ser investigadas, complementando o estudo de modelos digitais com modelos físicos e vice-versa. Enquanto que o CAM permite produzir um protótipo físico a partir do modelo digital, os processos de engenharia inversa possibilitam o contrário, isto é, a digitalização do material para, no digital, se proceder a novos estudos. Face ao tempo presente, e ao caso de estudo apresentado nesta dissertação, a atitude de Frei Otto parece poder ser continuada e enriquecida. Motivados pelas tecnologias digitais emergentes, arquitectos como Lars Spuybroek

---

<sup>171</sup> CAD consiste na abreviação de *Computer Aided Manufacturing*, enquanto que CAM, significa *Computer Aided Manufacturing*. A utilização da expressão CAD/CAM refere-se à utilização integrada de processos de desenho e manufacturação através do computador.



(NOX), Axel Killian, ou Achim Menges, persistem, hoje, no estudo e na expansão do legado inspirador de Frei Otto.

Assim, apoiada na lógica humana, a Arquitectura deverá constituir um exercício de racionalização, de observação e de experimentação apoiada em “ideias palpáveis”. Os modelos físicos devem ser utilizados em complementaridade com os modelos virtuais, possibilitando um controle multifacetado das diferentes variantes arquitectónicas e, conseqüentemente, uma experimentalidade metodológica, morfológica, funcional e estrutural mais rica. Se observarmos o caso de estudo apresentado nesta dissertação, deparamo-nos com um exemplo bem elucidativo do valor da experimentação na Arquitectura.

Com efeito, o Parque Olímpico de Munique, projecto que inicialmente revelava uma natureza impraticável, foi otimizado e projectado maioritariamente graças à experimentação. Os modelos e suportes gráficos que destes derivaram, revelaram-se como componente essencial para a planificação e resolução do projecto, permitindo desta forma projectar, calcular e testar as várias problemáticas arquitectónicas. Este processo contínuo de experimentação demonstra como as adversidades presentes na Arquitectura podem ser ultrapassadas durante a experimentação física e que as mesmas problemáticas dificilmente seriam ultrapassadas no mundo virtual. No entanto será possível subentender-se que a aproximação constante de Otto à arquitectura experimental/analógica deriva possivelmente do facto de grande parte da sua carreira anteceder a generalização da utilização do computador e acreditamos, que uma contextualização temporal diferente influenciaria a sua obra de forma distinta.

Em síntese, e para encerrar este estudo, concluímos o impacto da obra de Frei Otto se desdobra numa perspectiva temporal alargada. Fundamentada numa reflexão futurista, a sua arquitectura rege-se de acordo com os princípios harmónicos da Natureza, estabelece um equilíbrio entre o construído e o todo e revela uma preocupação constante de reduzir o grau de substancialidade, capaz de esbater os prejuízos causados pela construção e exploração exageradas da Arquitectura. O Homem e a Natureza surgem como elementos centrais da sua doutrina arquitectónica e, através de uma visão totalitária, a obra de Otto é construída a seu favor.



*“Trata-se de uma arquitectura que volta a sua atenção às origens, ao necessário, aos princípios básicos da vida e da Natureza; uma arquitectura em que a sensatez e o sentido comum recobram o seu valor [...]”.*<sup>171</sup>

---

<sup>171</sup> SONGEL, Juan Maria - *Frei Otto. Conversación con Juan Maria Songel*. p.90. [trad. do a.].



## BIBLIOGRAFIA

“AD : Architectural Design”. London : Wiley Academy. 2004, 74:3.

“AD : Architectural Design”. London : Wiley Academy. 2006. 76:2.

“AD : Architectural Design”. London : Wiley Academy. 2008. 78:6.

“AD : Architectural Design”. London : Wiley Academy. 2009. 79:6.

ALDERSEY-WILLIAMS, Hugh — **Zoomorphic: New Animal Architecture**. London : Laurence King Publishing Ltd, 2003. 176 p. ISBN 1-856693-40-6.

ALLEN, Edward — **How Buildings Work: The Natural Order of Architecture**. Oxford : Oxford University Press Inc, 2005. 270 p. ISBN 978-0-19-516198-4.

ALLEN, Peter; MAGUIRE, Steve; MCKELVEY, Bill - **The Sage Handbook of Complexity and Management**. London : Sage Publications Ltd, 2011. 644 p. ISBN 978-1-84787-569-3.

BENYUS, Janine M.— **Biomimicry: Innovation Inspired by Nature**. New York : Harper Collins Publishers, 1998. 320 p. ISBN: 978-0-06-053322-9.

BRAND, Stewart — How slums can save the planet. [Em linha]. [Consult. Junho 2012].

Disponível em: WWW:

<URL:<http://www.prospectmagazine.co.uk/magazine/how-slums-can-save-the-planet/>>

BRAND, Stewart — Environmental Heresies. Conservation Magazine [Em linha]. 7:2 (2006) [Consult. Junho 2012]. Disponível em: WWW:

<URL: <http://www.conservationmagazine.org/2008/07/environmental-heresies/>>.



CALLEBAUT, Vincent — **Archibiotic**. Beijing : AADCU + Hust Press, 2008. 303 p. ISBN 978-7-5609-4466-1.

CERVERA, M. Rosa; PIOZ, Javier — Las Formas de la Naturaleza. In **Arquitectura y Bionica IV**. Cuenca : Diputación Provincial de Cuenca, 2004. ISBN 978-84-92711-84-0. 13-21 p.

COSTA, Mauro — A biónica na Arquitectura. Arquitectura e Vida. Lisboa : Loja da Imagem. 74 (2006). 22-26.

COSTA, Mauro — Analogias Biológicas en la Arquitectura – Del acercamiento biónico hacia los paradigmas de lo biodigital. Barcelona : ESARQ - UIC, 2008. 637 p. Tese de Doutoramento.

COSTA, Mauro — Architecture and Biological Analogies – Finding a generative design process based on biological rules. [Em linha]. [Consult. Dezembro 2011]. Disponível em: WWW:  
<URL: <http://www.pt.scribd.com/doc/49773887/Architecture-and-Biological-Analogies>>.

COSTA, Mauro — La Arquitectura como extension fenotípica humana – un acercamiento basado en análisis computacionales. [Em linha]. [Consult. Novembro 2011]. Disponível em: WWW:  
<URL: [http://www.cumincades.scix.net/cgi-bin/works/Show?sigradi2006\\_e183a](http://www.cumincades.scix.net/cgi-bin/works/Show?sigradi2006_e183a)>

Di BARTOLO, Carmelo — Natureza como modelo, natureza como sistema. Experimenta 31. Madrid : Editorial Experimenta, 2000. ISBN 978-90-07-90031-5. 39-45 p.

DOCZI, Gyorgy — **The Power of Limits: Proportional Harmonies in Nature Art and Architecture**. Berkeley : Shambhala Publications, 2005. 160 p. ISBN 978-1590302590.



ELLAN, Eldad; CHIKOFSKY, Elliot J. — **Reversing: Secrets of Reversing Engineering**. Indianapolis : Wiley Publishing Inc., 2005. 624 p. ISBN 978-0-7645-7481-8.

ESTEVEZ, Alberto T. — Arquitectura biomórfica: Primera historia de la arquitectura genética o ¿la arquitectura genética es biomórfica? Organicismo digital, la vanguardia arquitectónica de los primeros años del siglo XXI. [Em linha]. [Consult. Outubro 2011]. Disponível em: WWW:  
<URL:[http://www.albertoestevez.com/writing/escritos\\_geneticos/escritos\\_geneticos03.pdf](http://www.albertoestevez.com/writing/escritos_geneticos/escritos_geneticos03.pdf)>.

ESTEVEZ, Alberto T. — Arquiteturas genéticas: el nuevo proyectar ecológico-medioambiental y el nuevo proyectar cibernético - digital. [Em linha]. [Consult. Outubro 2011]. Disponível em: WWW:  
<URL:[http://www.albertoestevez.com/writing/escritos\\_geneticos/escritos\\_geneticos01.pdf](http://www.albertoestevez.com/writing/escritos_geneticos/escritos_geneticos01.pdf)>.

GERARDIN, Lucien — **La biónica**. Madrid : Ediciones Guadamarra, 1968. 251 p.

GONZÁLEZ, Juan — Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart: una experiencia de metodología, investigación y sistematización en la búsqueda de la forma resistente. Valência : Universidad Politecnica de Valencia, 2005. 536 p. Tese de Doutorado.

GRUBER, Petra — **Biomimetics in Architecture: Architecture of life and buildings**. Vienna : SpringerWienNewYork, 2011. 275 p. ISBN 978-3-7091-0331-9.

GRUBER, Petra; JERONIMIDIS, George — Has Biomimetics arrived in Architecture. [Em linha]. [Consult. Março 2012]. Disponível em: WWW:  
<URL:<http://iopscience.iop.org/1748-3190/7/1/010201>>.



HAECKEL, Ernst — **Kunstformen der Natur**. München : Prestel Verlag, 1998. 396 p. ISBN 3-7913-1978-7.

HOLLAND, H. John — **Emergence, From Chaos to Order**. Oxford : Oxford University Press, 2000. 258 p. ISBN 0-19-286211-1

KRAUSE, Jeffrey — Reflections: The Creative Process of Generative Design in Architecture. BArch USC, SMArchS MIT. [Em linha]. [Consult. Janeiro 2012]. Disponível em: WWW:  
<URL:[http://arch.blacksquare.com/docs/krause\\_gen2003\\_press.pdf](http://arch.blacksquare.com/docs/krause_gen2003_press.pdf) >.

LIM, Joseph — **Biostructural analogies in architecture**. Amsterdam : BIS Publisher, 2009. 255 p. ISBN 978-90-6369-204-9.

LITINETSKI, IB — **Iniciación a la Biónica**. Barcelona : Barral Editores, 1975. 288 p. ISBN 84-211-7419-3.

LODATO, Franco — Bionica: la naturaleza como herramienta de inovación. Experimenta 31. Madrid : Editorial Experimenta, 2000. ISBN 978-90-07-90031-5. 46-51 p.

LYNN, Greg — **Greg Lynn Form**. New York : Rizzoli International, 2008. 367 p. ISBN 978-0-8478-3102-9.

MACNAB, Maggie — **Design by Nature, using forms and principles in design**. Berkeley : New Riders, 2012. 293 p. ISBN 978-0-321-74776-1.

MALMANGER, Nelly — 80 anos de Frei Otto. [Em linha]. [Consult. Dezembro 2011]. Disponível em: WWW:  
<URL: [http://www.infomadera.net/uploads/articulos/archivo\\_4992\\_23325.pdf](http://www.infomadera.net/uploads/articulos/archivo_4992_23325.pdf)>.



MERTINS, Detlef — Where Architecture Meets Biology: An Interview with Detlef Mertins. [Em linha]. [Consult. Janeiro 2012]. Disponível em: WWW:  
<URL:[http://www.repository.upenn.edu/arch\\_papers/7](http://www.repository.upenn.edu/arch_papers/7)>.

MUÑOZ-CHAPULI, Ramón — Evo-Devo: Hacia un nuevo paradigma en Biología Evolutiva. [Em linha]. [Consult. Julho 2012]. Disponível em: WWW:  
<URL:<http://www.encuentros.uma.es/encuentros100/evodevo.htm>>.

NERDINGER, Winfred (ed.) — **Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design**. Basel : Birkhauser, 2005. 391 p. ISBN 978-3-7643-7231-6.

NEVES, Isabel Clara — Aproximações da Arquitectura à Biologia – Levantamento interpretativo de experimentações contemporâneas . Lisboa : FAUTL. 2008. 204 p. Tese de Mestrado.

New Oxford American Dictionary, program version 1.0.1, 2005.

ONU — Convenção sobre diversidade biológica. [Em linha]. [Consult. Janeiro 2012]. Disponível em: WWW:  
<URL: [http://www.rbma.org.br/anuario/pdf/legislacao\\_01.pdf](http://www.rbma.org.br/anuario/pdf/legislacao_01.pdf)>.

OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal**. Munich : Axel Menges, 1995. 239 p. ISBN 3-930698-66-8.

OTTO, Frei — **Architecture et bionique: constructions naturelles**. Paris : Delta & Spes, 1985. 152 p. ISBN 9-782881-6-10240.



PAWLEY, Martin — **Buckminster Fuller**. New York : Taplinger Publishing Company, 1990. 192 p. ISBN: 0-8008-1116-X.

ROUDAVSKI, Stanislav — Towards Morphogenesis in Architecture. [Em linha]. [Consult. Novembro 2011]. Disponível em: WWW:  
<URL:[http://www.unimelb.academia.edu/StanimlavRoudavski/Papers/135601/Towards\\_Morphogenesis\\_in\\_Architecture](http://www.unimelb.academia.edu/StanimlavRoudavski/Papers/135601/Towards_Morphogenesis_in_Architecture)>.

SENOSIAIN, Javier — **Bio Arquitectura: en busca de un espacio**. Ciudad de Mexico : Limusa - Noriega Grupo Editores, 1998. 194 p. ISBN 978-968-18-5298-6.

SIMS, Karl — Evolving Virtual Creatures. [Em linha]. [Consult. Julho 2012]. Disponível em: WWW:  
<URL:<http://www.karlsims.com/papers/siggraph94.pdf>>.

SONGEL, Gabriel — Naturaleza, diseño e innovación: una propuesta metodológica. Milán . [Em linha]. [Consult. Abril 2011]. Disponível em: WWW:  
<URL:<http://www.tdd.elisava.net/coleccion/10/natura-disseny-i-innovacio-proposta-metodologica-es>>.

SONGEL, Juan Maria — **Frei Otto. Conversación con Juan Maria Songel**. Barcelona : Editorial Gustavo Gili, 2008. 96 p. ISBN 978-84-252-2205-4.

SONGEL, Juan Maria — Frei Otto y la génesis de la forma arquitectónica. [Em linha]. [Consult. Abril 2011]. Disponível em: WWW:  
<URL: <http://www.riunet.upv.es/handle/10251/14810>>.

STEADMAN, Philip — **The evolution of designs: Biological analogy in architecture and applied arts**. Abingdon, Oxon : Routledge, 2008. 302p. ISBN 978-0-415-44753-9.



THOMPSON, D'Arcy W. — **On Growth and Form**. Cambridge : Cambridge University Press, 2010. 345 p. ISBN 978-0-521-43776-9.

VICENT, Julian V. F. — Borrowing the best from Nature. In **Encyclopaedia Britannica Yearbook of Science and the Future** : London, 1995. ISBN 978-0-85229-602-8. 168–187 p.

VINCENT, Julian V. F. [et al.] — Biomimetics: its practice and theory. Jornal of the Royal Society. Interface. [Em linha]. 3 (2006). 471-482 p. [Consult. Março 2012]. Disponível em: WWW:

<URL: <http://www.rsif.royalsocietypublishing.org/content/3/9/471.full.pdf+html>>.



## REFERÊNCIAS DE IMAGENS

1. [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c2/Paleolithic\\_tent.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c2/Paleolithic_tent.jpg)
2. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal**. Munich : Axel Menges, 1995. p.37.
3. <http://civicvirtue.info/weblog/wp-content/uploads/foto2.jpg>
4. [http://www.flickr.com/photos/gorka\\_eh/6194374657/](http://www.flickr.com/photos/gorka_eh/6194374657/)
5. <http://arte.observatorio.info/wp-content/uploads/2007/11/cariatides.jpg>
6. [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e5/Ctesiphon%2C\\_Iraq\\_%28282117465493%29.jpg?uselang=es](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e5/Ctesiphon%2C_Iraq_%28282117465493%29.jpg?uselang=es)
7. <http://www.storiadelleimmagini.it/2011/02/invenzioni-leonardo-codice-vo-lo-uccelli-studi-macchine-volanti/>
8. [http://www.girovagandointrentino.it/pinterna\\_m.htm?http://www.girovagandointrentino.it/punte/2003/estate/riva/leonardo.htm?a](http://www.girovagandointrentino.it/pinterna_m.htm?http://www.girovagandointrentino.it/punte/2003/estate/riva/leonardo.htm?a)
9. <http://www.american-buddha.com/agaudicrypt17.jpg>
10. [http://www.septemvoices.com/images/sf01\\_400.jpg](http://www.septemvoices.com/images/sf01_400.jpg)
11. <http://www.flickr.com/photos/jordipostales/2390846852/>
12. [http://www.archdaily.com/224032/sfmoma-exhibit-the-utopian-impulse-buckminster-fuller-and-the-bay-area/sfmoma\\_fuller\\_01\\_geodesicdome/](http://www.archdaily.com/224032/sfmoma-exhibit-the-utopian-impulse-buckminster-fuller-and-the-bay-area/sfmoma_fuller_01_geodesicdome/)
13. [http://www.archdaily.com/224032/sfmoma-exhibit-the-utopian-impulse-buckminster-fuller-and-the-bay-area/sfmoma\\_fuller\\_06\\_laminargeodesic/](http://www.archdaily.com/224032/sfmoma-exhibit-the-utopian-impulse-buckminster-fuller-and-the-bay-area/sfmoma_fuller_06_laminargeodesic/)
14. GRUBER, Petra — **Biomimetics in Architecture: Architecture of life and buildings**. Vienna : SpringerWienNewYork, 2011. p.94.
15. <http://www.learning-southwest.org.uk/asset/Eden%20Project.JPG>
16. <http://www.flickr.com/photos/frankstelt/805571538/lightbox/>
17. <http://openbuildings.com/buildings/walking-city-profile-39003#!buildings-media/1>
18. <http://3.bp.blogspot.com/-k6-9FBR39CI/TaPKrZ4j9MI/AAAAAAAAABc/LlpTL3-dRHU/s1600/2.jpg>
19. <http://eliinbar.files.wordpress.com/2011/10/calatrava-com-1-32.jpg>
20. <http://3.bp.blogspot.com/-KZJAEj7Ajro/Tlts7LnXi7I/AAAAAAAAACc/n7HFDfZDdPM/s1600/DSC01252.jpg>
21. [http://www.cliphitheryon.com/images/jpg/architecture/Blur\\_3\\_Section.jpg](http://www.cliphitheryon.com/images/jpg/architecture/Blur_3_Section.jpg)
22. GRUBER, Petra — **Biomimetics in Architecture: Architecture of life and buildings**. Vienna : SpringerWienNewYork, 2011. p.192.
23. GRUBER, Petra — **Biomimetics in Architecture: Architecture of life and buildings**. Vienna : SpringerWienNewYork, 2011. p.125.
24. "AD : Architectural Design". London : Wiley Academy. 2004, 74:3.p 37.
25. MACNAB, Maggie — **Design by Nature, using forms and principles in design**. Berkeley : New Riders, 2012. p. 46.
26. <https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=dXAuZWR1Lm14fGRlc2lnbmF0dXJhbHxneD o1MWJmNzRmOTVhNDYyYTg>
27. <http://www.achimmenges.net/?p=5123>
28. <http://www.achimmenges.net/?p=5123>
29. <http://www.dabbler.ca/wp-content/uploads/2008/06/ecopolis8.jpg>
30. <http://dibari-id.com/Blogging%20the%20Future/Blog%20Images/Posts/Lilypad4.jpg>
31. GRUBER, Petra — **Biomimetics in Architecture: Architecture of life and buildings**. Vienna : SpringerWienNewYork, 2011. p.65.
32. GRUBER, Petra — **Biomimetics in Architecture: Architecture of life and buildings**. Vienna : SpringerWienNewYork, 2011. p.23.
33. GRUBER, Petra — **Biomimetics in Architecture: Architecture of life and buildings**. Vienna : SpringerWienNewYork, 2011. p.23.
34. <http://volcania.files.wordpress.com/2010/11/bizarre-snail-shaped-house-javier-senosiain.jpg>
35. [http://www.publicararquitectura.com/\\_proyectos/\\_casa-tiburon/content/bin/images/large/\\_7709849992.jpg](http://www.publicararquitectura.com/_proyectos/_casa-tiburon/content/bin/images/large/_7709849992.jpg)
36. <http://thefuturist.co/wp-content/uploads/2011/03/biomimetics1-620x330.jpg>
37. [http://vincent.callebaut.org/planche-physalia\\_pl21.html](http://vincent.callebaut.org/planche-physalia_pl21.html)
38. <http://images.tutorvista.com/content/feed/tvcs/DNA20vs2ORNA.jpg>



39. GRUBER, Petra — **Biomimetics in Architecture: Architecture of life and buildings**. Vienna : SpringerWienNewYork, 2011. p.181.
40. GRUBER, Petra — **Biomimetics in Architecture: Architecture of life and buildings**. Vienna : SpringerWienNewYork, 2011. p.181.
41. [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cd/Sand\\_dune\\_ripples.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cd/Sand_dune_ripples.jpg)
42. [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/77/Water\\_Crystals\\_on\\_Mercury\\_20Feb2010\\_CU1.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/77/Water_Crystals_on_Mercury_20Feb2010_CU1.jpg)
43. [http://eostrowski.squarespace.com/storage/Blanton.jpg?\\_\\_SQUARESPACE\\_CACHEVERSION=1306008743456](http://eostrowski.squarespace.com/storage/Blanton.jpg?__SQUARESPACE_CACHEVERSION=1306008743456)
44. [http://www.antibodyreview.com/article\\_images/17845714/BMC%20Evol%20Biol/7-\\_/p160-2034539/1471-2148-7-160-1.jpg](http://www.antibodyreview.com/article_images/17845714/BMC%20Evol%20Biol/7-_/p160-2034539/1471-2148-7-160-1.jpg)
45. [http://s7.computerhistory.org/is/image/CHM/102693527-03-01?\\$re-zoomed\\$](http://s7.computerhistory.org/is/image/CHM/102693527-03-01?$re-zoomed$)
46. [http://news.harvard.edu/gazette/wp-content/uploads/2012/02/WholeBee-sm\\_605.jpg](http://news.harvard.edu/gazette/wp-content/uploads/2012/02/WholeBee-sm_605.jpg)
47. SIMS, Karl — Evolving Virtual Creatures. p.2.
48. SIMS, Karl — Evolving Virtual Creatures. p.2.
49. SIMS, Karl — Evolving Virtual Creatures. p.7.
50. [http://a7.sphotos.ak.fbcdn.net/hphotos-ak-snc7/382482\\_239782322804933\\_751869061\\_n.jpg](http://a7.sphotos.ak.fbcdn.net/hphotos-ak-snc7/382482_239782322804933_751869061_n.jpg)
51. <http://www.denmark.net/files/imagecache/Display/photos/black-sun-1.png>
52. COSTA, Mauro — La Arquitectura como extension fenotípica humana – un acercamiento basado en análisis computacionales. p. 4.
53. COSTA, Mauro — Analogías Biológicas en la Arquitectura – Del acercamiento biónico hacia los paradigmas de lo biodigital. Barcelona : ESARQ - UIC, 2008. Tese de Doutoramento. p. 535.
54. COSTA, Mauro — Analogías Biológicas en la Arquitectura – Del acercamiento biónico hacia los paradigmas de lo biodigital. Barcelona : ESARQ - UIC, 2008. Tese de Doutoramento. p. 537.
55. “AD : Architectural Design”. London : Wiley Academy. 2004, 74:3. p.64.
56. <http://michael-hansmeyer.com/projects/columns.html?screenSize=1&color=1#18>
57. <http://marcoscruzarchitect.blogspot.pt/2010/01/in-wall-creatures.html>
58. “AD : Architectural Design”. London : Wiley Academy. 2008. 78:6.
59. GONZÁLEZ, Juan — Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart: una experiencia de metodología, investigación y sistematización en la búsqueda de la forma resistente. València : Universidad Politecnica de Valencia, 2005. Tese de Doutoramento. p.172.
60. MACNAB, Maggie — **Design by Nature, using forms and principles in design**. Berkeley : New Riders, 2012. p. 145.
61. MACNAB, Maggie — **Design by Nature, using forms and principles in design**. Berkeley : New Riders, 2012. p. 273.
62. <http://coisasdaarquitectura.files.wordpress.com/2010/06/modulor.jpg>
63. [http://kirstyleonard.files.wordpress.com/2011/10/spiral\\_jetty\\_wisps.jpg](http://kirstyleonard.files.wordpress.com/2011/10/spiral_jetty_wisps.jpg)
64. MACNAB, Maggie — **Design by Nature, using forms and principles in design**. Berkeley : New Riders, 2012. p. 123.
65. MACNAB, Maggie — **Design by Nature, using forms and principles in design**. Berkeley : New Riders, 2012. p. 106.
66. MACNAB, Maggie — **Design by Nature, using forms and principles in design**. Berkeley : New Riders, 2012. p. 123.
67. MACNAB, Maggie — **Design by Nature, using forms and principles in design**. Berkeley : New Riders, 2012. p. 264.
68. <http://palaeomath.palass.org/images/shape2/Fig1.jpeg>
69. MACNAB, Maggie — **Design by Nature, using forms and principles in design**. Berkeley : New Riders, 2012. p. 233.
70. MACNAB, Maggie — **Design by Nature, using forms and principles in design**. Berkeley : New Riders, 2012. p. 233.
71. <http://img.gran-angular.net/9/TDC/fractales/romanesco01.jpg>
72. <http://img.gran-angular.net/9/TDC/fractales/girasol01.jpg>
73. MACNAB, Maggie — **Design by Nature, using forms and principles in design**. Berkeley : New Riders, 2012. p. 116.
74. <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=625>



75. GRUBER, Petra — **Biomimetics in Architecture: Architecture of life and buildings**. Vienna : SpringerWienNewYork, 2011. p.43.
76. COSTA, Mauro — Analogías Biológicas en la Arquitectura – Del acercamiento biónico hacia los paradigmas de lo biodigital. Barcelona : ESARQ - UIC, 2008. p. 61.
77. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design**. Basel : Birkhauser, 2005. p. 90.
78. GONZÁLEZ, Juan — Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart: una experiencia de metodología, investigación y sistematización en la búsqueda de la forma resistente. València : Universidad Politecnica de Valencia, 2005. Tese de Doutoramento. p.190.
79. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design**. Basel : Birkhauser, 2005. p. 14.
80. GONZÁLEZ, Juan — Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart: una experiencia de metodología, investigación y sistematización en la búsqueda de la forma resistente. València : Universidad Politecnica de Valencia, 2005. Tese de Doutoramento. p.192.
81. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design**. Basel : Birkhauser, 2005. p. 154.
82. HAECKEL, Ernst — **Kunstformen der Natur**. München : Prestel Verlag, 1998. p.288.
83. HAECKEL, Ernst — **Kunstformen der Natur**. München : Prestel Verlag, 1998. p.140.
84. <http://www.cell-research.com/20034/Cover-final2.gif>
85. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design**. Basel : Birkhauser, 2005. p. 151.
86. <http://www.3viajesaldia.com/wp-content/uploads/2009/06/kheops-pyramid.jpg?9d7bd4>
87. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal**. Munich : Axel Menges, 1995. p.46.
88. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal**. Munich : Axel Menges, 1995. p.49.
89. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal**. Munich : Axel Menges, 1995. p.49.
90. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal**. Munich : Axel Menges, 1995. p.50.
91. GONZÁLEZ, Juan — Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart: una experiencia de metodología, investigación y sistematización en la búsqueda de la forma resistente. València : Universidad Politecnica de Valencia, 2005. Tese de Doutoramento. p.205.
92. [http://jeremiah33three.files.wordpress.com/2008/09/spider\\_web2.jpg](http://jeremiah33three.files.wordpress.com/2008/09/spider_web2.jpg)
93. <http://silviarita.files.wordpress.com/2010/08/colmeia.jpg>
94. [http://lh5.ggpht.com/-tMiH9apFXQg/S50LQHJ\\_zel/AAAAAAAAABPU/CI0ZUc3Z9dk/1024IMG\\_0939.jpg](http://lh5.ggpht.com/-tMiH9apFXQg/S50LQHJ_zel/AAAAAAAAABPU/CI0ZUc3Z9dk/1024IMG_0939.jpg)
95. [http://www.sciencephoto.com/image/367923/530wm/Z2900027-Termite\\_nest-SPL.jpg](http://www.sciencephoto.com/image/367923/530wm/Z2900027-Termite_nest-SPL.jpg)
96. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design**. Basel : Birkhauser, 2005. p. 60.
97. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design**. Basel : Birkhauser, 2005. p. 56.
98. [http://www.rok-office.com/media/uploads/images/thumbs/3e20a82312574a67aa11d75642d0fa56\\_460\\_325\\_80.jpg](http://www.rok-office.com/media/uploads/images/thumbs/3e20a82312574a67aa11d75642d0fa56_460_325_80.jpg)
99. [http://www.rok-office.com/media/uploads/images/thumbs/3e20a82312574a67aa11d75642d0fa56\\_460\\_325\\_80.jpg](http://www.rok-office.com/media/uploads/images/thumbs/3e20a82312574a67aa11d75642d0fa56_460_325_80.jpg)
100. [http://www.core.form-ula.com/wp-content/uploads/2007/12/1282431967\\_stuttgart-6thumbnail.jpg](http://www.core.form-ula.com/wp-content/uploads/2007/12/1282431967_stuttgart-6thumbnail.jpg)
101. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal**. Munich : Axel Menges, 1995. p.25.
102. <http://stacyjulian.com/blog/wp-content/uploads/2009/10/earth-from-space-western.jpg>
103. [http://contrailscience.com/wp-content/uploads/esc\\_large\\_iss0200-wide.jpg](http://contrailscience.com/wp-content/uploads/esc_large_iss0200-wide.jpg)
104. [http://1.bp.blogspot.com/\\_aOVUVB-gmBA/TPhgS9y5e8I/AAAAAAAAAx2E/ZIGTiEGFFAs/s1600/Rock\\_Formation\\_Ireland\\_09.jpg](http://1.bp.blogspot.com/_aOVUVB-gmBA/TPhgS9y5e8I/AAAAAAAAAx2E/ZIGTiEGFFAs/s1600/Rock_Formation_Ireland_09.jpg)



105. [http://www.magentamagazine.com/index.php?q=img\\_assist/popup/865](http://www.magentamagazine.com/index.php?q=img_assist/popup/865)
106. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal**. Munich : Axel Menges, 1995. p.30.
107. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal**. Munich : Axel Menges, 1995. p.30.
108. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal**. Munich : Axel Menges, 1995. p.31.
109. <http://www.stopcurtisbay.com/wp-content/uploads/2011/11/Baby-in-the-Womb-300x227.jpg>
110. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal**. Munich : Axel Menges, 1995. p.37.
111. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal**. Munich : Axel Menges, 1995. p.38.
112. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal**. Munich : Axel Menges, 1995. p.39.
113. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal**. Munich : Axel Menges, 1995. p.39.
114. GONZÁLEZ, Juan — Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart: una experiencia de metodología, investigación y sistematización en la búsqueda de la forma resistente. València : Universidad Politécnica de Valencia, 2005. Tese de Doutoramento. p.165.
115. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal**. Munich : Axel Menges, 1995. p.58.
116. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal**. Munich : Axel Menges, 1995. p.59.
117. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal**. Munich : Axel Menges, 1995. p.59.
118. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal**. Munich : Axel Menges, 1995. p.58.
119. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design**. Basel : Birkhauser, 2005. p. 192.
120. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal**. Munich : Axel Menges, 1995. p.61.
121. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal**. Munich : Axel Menges, 1995. p.116.
122. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal**. Munich : Axel Menges, 1995. p.116.
123. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal**. Munich : Axel Menges, 1995. p.118.
124. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal**. Munich : Axel Menges, 1995. p.119.
125. NERDINGER, Winfried — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design**. Basel : Birkhauser, 2005. p. 281.
126. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal**. Munich : Axel Menges, 1995. p.77.
127. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design**. Basel : Birkhauser, 2005. p. 139.
128. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design**. Basel : Birkhauser, 2005. p. 185.
129. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design**. Basel : Birkhauser, 2005. p. 185.
130. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal**. Munich : Axel Menges, 1995. p.79.
131. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal**. Munich : Axel Menges, 1995. p.79.
132. NERDINGER, Winfried — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design**. Basel : Birkhauser, 2005. p. 313.
133. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal**. Munich : Axel Menges, 1995. p.93.



134. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design.** Basel : Birkhauser, 2005. p. 309.
135. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design.** Basel : Birkhauser, 2005. p. 301.
136. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design.** Basel : Birkhauser, 2005. p. 241.
137. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design.** Basel : Birkhauser, 2005. p. 234.
138. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design.** Basel : Birkhauser, 2005. p. 229.
139. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design.** Basel : Birkhauser, 2005. p. 232.
140. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design.** Basel : Birkhauser, 2005. p. 242.
141. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design.** Basel : Birkhauser, 2005. p. 242.
142. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design.** Basel : Birkhauser, 2005. p. 242.
143. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal.** Munich : Axel Menges, 1995. p.127.
144. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal.** Munich : Axel Menges, 1995. p.130.
145. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal.** Munich : Axel Menges, 1995. p.130.
146. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal.** Munich : Axel Menges, 1995. p.132.
147. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal.** Munich : Axel Menges, 1995. p.137.
148. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal.** Munich : Axel Menges, 1995. p.137.
149. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal.** Munich : Axel Menges, 1995. p.137.
150. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design.** Basel : Birkhauser, 2005. p. 68.
151. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design.** Basel : Birkhauser, 2005. p. 67.
152. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design.** Basel : Birkhauser, 2005. p. 67.
153. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design.** Basel : Birkhauser, 2005. p. 286.
154. [http://www.smdarq.net/wp-content/uploads/2009/10/OttoMultihalle-ext\\_view.jpg](http://www.smdarq.net/wp-content/uploads/2009/10/OttoMultihalle-ext_view.jpg)
155. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design.** Basel : Birkhauser, 2005. p. 287.
156. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design.** Basel . Boston . Berlin : Birkhauser, 2005. p. 296.
157. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal.** Munich : Axel Menges, 1995. p.143.
158. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal.** Munich : Axel Menges, 1995. p.162.
159. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal.** Munich : Axel Menges, 1995. p.162.
160. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal.** Munich : Axel Menges, 1995. p.165.
161. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal.** Munich : Axel Menges, 1995. p.161.
162. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design.** Basel : Birkhauser, 2005. p. 296.



163. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design.** Basel : Birkhauser, 2005. p. 297.
164. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal.** Munich : Axel Menges, 1995. p.69.
165. [http://25.media.tumblr.com/tumblr\\_lzm1g5FEjg1royjuqo3\\_500.jpg](http://25.media.tumblr.com/tumblr_lzm1g5FEjg1royjuqo3_500.jpg)
166. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design.** Basel : Birkhauser, 2005. p. 261.
167. <http://fancycribs.com/wp-content/uploads/2011/02/AD-Classics-Munich-Olympic-Stadium-Frei-Otto-Gunther-Behnisch-4-670x212.jpg>
168. <http://diselabia.files.wordpress.com/2008/07/otto-03.jpg>
169. <http://fancycribs.com/wp-content/uploads/2011/02/AD-Classics-Munich-Olympic-Stadium-Frei-Otto-Gunther-Behnisch-16-670x84.jpg>
170. <http://diselabia.files.wordpress.com/2008/07/otto-09.jpg>
171. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal.** Munich : Axel Menges, 1995. p.34.
172. [http://www.tensinet.com/project\\_files/3779/OLYMPI\\_MUNICH\\_OTTO\\_\\_\\_STADIU\\_DV01.jpg](http://www.tensinet.com/project_files/3779/OLYMPI_MUNICH_OTTO___STADIU_DV01.jpg)
173. [http://www.tensinet.com/project\\_files/3779/OLYMPI\\_MUNICH\\_OTTO\\_\\_\\_STADIU\\_DV02.jpg](http://www.tensinet.com/project_files/3779/OLYMPI_MUNICH_OTTO___STADIU_DV02.jpg)
174. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design.** Basel : Birkhauser, 2005. p. 264.
175. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design.** Basel : Birkhauser, 2005. p. 264.
176. NERDINGER, Winfried — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design.** Basel : Birkhauser, 2005. p. 265.
177. OTTO, Frei; RASCH, Bodo — **Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal.** Munich : Axel Menges, 1995. p.107.
178. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design.** Basel : Birkhauser, 2005. p. 265.
179. <http://fancycribs.com/wp-content/uploads/2011/02/AD-Classics-Munich-Olympic-Stadium-Frei-Otto-Gunther-Behnisch-2-600x802.jpg>
180. [http://www.flickr.com/photos/atelier\\_flir/2752219682/sizes/l/in/photostream/](http://www.flickr.com/photos/atelier_flir/2752219682/sizes/l/in/photostream/)
181. <http://fancycribs.com/wp-content/uploads/2011/02/AD-Classics-Munich-Olympic-Stadium-Frei-Otto-Gunther-Behnisch-6-670x198.jpg>
182. <http://fancycribs.com/wp-content/uploads/2011/02/AD-Classics-Munich-Olympic-Stadium-Frei-Otto-Gunther-Behnisch-670x445.jpg>
183. NERDINGER, Winfried (ed.) — **Frei Otto complete Works: Lightweight Construction Natural Design.** Basel : Birkhauser, 2005. p. 359.



## **ANEXOS**



## Biografia de Frei Otto

**1925.** Nasce Frei Otto a 31 de Maio em Siegmarsdorf, Sajonia; infância e juventude passada em Berlim; entra na escola Schadow em Berlin-Zehlendorf; aprendiz de alvenaria de pedra durante as férias; piloto de avião planador.

**1943.** Inicia os estudos de arquitectura na *Technische Hochschule Berlim*

**1943-45.** Cumpre o serviço militar piloto de avião de esquadrilha de combate.

**1948-47.** Prisioneiro de guerra em França, próximo de Chatres; arquitecto do campo.

**1950-51.** Estudou arquitectura na Universidade Técnica de Berlim com os professores Hans Freese, Helmuth Bickenbach e Gerhard Jobst.

**1950-51.** Consegue uma bolsa de estudo através da Fundação Académica Nacional da Alemanha; viaja até aos E.U.A. para estudar os trabalhos de Frank Lloyd Wright, Fred N. Severud, Erich Mendelsohn, Eero Saarinen, Ludwig Mies van der Rohe, Richard Neutra, Charles e Ray Eames; Estuda sociologia e desenvolvimento urbano na Universidade de Virgínia, Charlottesville.

**1952.** Graduado na Universidade Técnica de Berlim; trabalha como arquitecto freelancer em Berlim; funda o seu próprio atelier de arquitectura.

**1953.** Dá início à sua tese doutoral *Das hängende Dach* (O tecto suspenso).

**1954.** Doutoramento em engenharia civil na Universidade Técnica de Berlim; a sua tese “ O tecto suspenso. Forma e estrutura” é publicada em alemão, polaco, espanhol e russo; começa a trabalhar com o “fabricante de tendas” *Peter Stromeyer na L. Stromeyer & Co.*

**1955.** Fundação do Instituto para o desenvolvimento de Construções Ligeiras (*Entwicklungsstätte für den Leichtbau, EL*); estúdio Berlim-Zehlendorf; Professor convidado na Universidade de Washington, St. Louis, E.U.A.

**1959.** Conferencista convidado na Universidade de Desenho (*Hochschule für Gestaltung HfG.*) em Ulm

**1960.** Professor visitante na Universidade de Yale, New Haven, E.U.A.

**1961.** Trabalha como assistente para Peter Poelzls na Universidade Técnica de Berlim; seminário Construções ligeiras; conhece Johann- Gerhard Helmcke (1908-1993), professor de biologia e antropologia; fundação do grupo de investigação sobre biologia



e construção na Universidade Técnica de Berlim; início dos trabalhos entre arquitectos, engenheiros e biólogos.

**1962.** Publicação de *Estruturas Tensionadas*, Desenho, Estrutura e cálculo de cabos, redes e membrana, primeiro volume publicado em alemão, inglês, húngaro e russo; Seminário especial sobre construções mínimas na Universidade Técnica de Berlim; professor visitante na Universidade de Califórnia, Berkeley, no Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), Cambridge, a Universidade de Harvard, Cambridge, todas nos E.U.A.; seminário na Universidade de Zulia, Maracaibo, Venezuela.

**1964.** Fundação do *Institut für leichte Flächentragwerke*, IL (Instituto de Estruturas Ligeiras) na Universidade de Stuttgart; é nomeado director do Instituto, o qual está associado ao departamento de engenharia de construção na Faculdade de engenharia civil e estrutural.

**1965.** Nomeado professor honorário na Universidade de Stuttgart. Seminário no Instituto Nacional de Desenho, Ahmedabad, India, nomeado comissário do IL pelo governo alemão para liderar as investigações relacionadas com a planificação do pavilhão alemão na Exposição Universal de Montreal.

**1966.** Publicação do segundo volume de *Estruturas Tensionadas*; protótipos (Stuttgart-Vaihingen) para o pavilhão alemão de Montreal.

**1967.** Pavilhão alemão da Expo-67 de Montreal feito em colaboração com Rolf Gutbrod; triunfa internacionalmente como arquitecto e engenheiro; ampliação do protótipo para o instituto permanente de investigação; prémios de Arte da Cidade de Berlim e Perre da União Internacional dos Arquitectos; divisão da Universidade de Stuttgart em departamentos – o IL pertence agora ao dept. De Engenharia Estrutural.

**1968.** *Honorary Fellow* do Instituto Americano de Arquitectos; comissário do IL por *Olympiabaugesellschaft* em Munich para construir modelos de medição para a cobertura do Estádio Olímpico de Munich, preparação do projecto de Munich, especial de Investigação (SFB) 64 “Estruturas ligeiras de grande luz” na Fundação Alemã de Investigação (DFG).

**1969.** Fundação do Estúdio Warmbronn de arquitectura- Frei Otto e Ewald Bubner.

**1970.** Membro da Academia de Arte de Berlim.



**1971.** Dirige as aulas de arquitectura da Academia de Verão das Belas Artes em Salzburgo. Exposição individual do Museu de Arte Moderno de Nova Iorque (MoMA).

**1973.** Doutor honorário na Universidade de Washington, E.U.A.

**1974.** Recebe o Prémio Thomas Jefferson e a Medalha de Arquitectura da Universidade de Virgínia, Charlottesville, E.U.A.

**1976.** Professor na Universidade de Stuttgart.

**1977.** Professor honorário da Universidade Nacional Frederico Villarreal, Lima, Peru.

**1978.** Prémio Hugo-Häring (junto com Carlfried Mutschler e Joachim Langner) pela nave de Mannheim.

**1979.** Seminários em Singapura e Indonésia.

**1980.** Doutor honorário de Ciência, Universidade Bath, Inglaterra; prémio Aga Khan de Arquitectura (juntamente com Rolf Gutbrod) pelo centro de conferências de Mecca, Arabia Saudita, seminários em Austrália.

**1981.** Exposição *Construções Naturais*, organizada pelo Instituto para as Relações Internacionais de Stuttgart, é realizada em cerca de 80 países nos Institutos Goethe; preparação para um novo projecto de investigação sobre o tema *Construções Naturais*.

**1982.** Recebe a Medalha de Investigação e técnica pela *Académie d'Architecture*, Paris; *Honorary Fellow* no *Royal Institute of British Architects* (RIBA), Londres; recebe o Grande Prémio e a medalha de ouro da Associação de Arquitectos Alemães (BDA).

**1983.** Exposição e seminário *Construções Naturais* no museu de Shushev, Moscovo.

**1984.** Membro fundador do Projecto 230 de Investigação Especial *Construções naturais - construções ligeiras em Arquitectura e Natureza* na Fundação Alemã de Investigações (DFG); instituições participativas: universidades de Stuttgart, Tuebingen, Saarland y Hohenheim; o projecto alemão de investigação interdisciplinar mais importante até à data realizado: arquitectos, engenheiros, biólogos, científicos do comportamento, paleontólogos, morfólogos, físicos, teóricos do caos, médicos, historiadores e filósofos.

**1985.** Continua em activo no SFB 64 (1971-1985) e SFB 230 (1984-1995).

**1986.** *Honorary Fellow* no Colégio Profissional de Engenheiros Estruturais, Londres.



**1990.** Doutor Honoris Causa na Universidade de Essen, Alemanha.

**1991.** Professor Emérito.

**1992.** Exposição para o Prémio Werkbund: *Encontrar a Forma (Gestalt Finden)*.  
Frei Otto e Bodo Rasch na Villa Stuck, Munich.

**1995.** Finalização do Projecto 230 de Investigação Especial *Construções naturais*;  
professor visitante no *Staatliche Hochschule für Gestaltung*, Karlsruhe.

**1996.** Grande Prémio da Associação Alemã de Arquitectos e Engenheiros, Berlim.

**1998.** Prémio Aga Khan de Arquitectura (junto com Omrania e Happold) pelo Club  
Diplomática em Riyadh, Arábia Saudita.

**2005.** Medalha Real de Ouro do Instituto Real de Arquitectos Britânicos (RIBA).  
Doutor Honoris Causa pela Universidade Técnica de Munich; exposição da obra  
completa de Frei Otto no Museu de Arquitectura de Munich, Alemanha.<sup>172</sup>

---

<sup>172</sup> MALMANGER, Nelly - *80 anos de Frei Otto*. p. 6/7. [trad. do a.].



## **Publicações *Mitteilungen des IL*:**

**IL 1:** Minimal Nets, 1969, 56 pages. Documentation of soap film tests to connect any number of points in plane or in space in a path connect system with minimum lengths.

**IL 2:** City in the Arctic, 1971, 56 pages. Study for a city under a transparent envelope with artificial climate.

**IL 3:** Biology and Building 1, 1971, 70 pages. Colloquium proceedings. Topics: the individual and its environment, the critical situation in a growing society, and animal buildings, urban planning, biological knowledge.

**IL 4:** Biology and Building 2, 1971, 80 pages. Practical application of analogous research: from hydrostatic skeleton to skeletal muscle system, sandwich structures within bird skulls, the principles of lightweight structures in organisms, static of extremities.

**IL 5:** Convertible Roofs, 1972, 400 pages. Research about the historical development of roofs: documentation of convertible structures, construction analysis with basics of form, geometry and movements, further development of convertible roofs.

**IL 6:** Biology and Building 3, 1973, 86 pages. Spider nets, construction of bones and a biophysical general model, with three-dimensional anaglyph pictures and 3D-glasses.

**IL 7:** Shadow in the Desert, 1974, 88 pages Project study: shade net roofs for hot regions. Problems of climate control, structural problems, material expenditure and costs.

**IL 8:** Nets in Nature and Technics, 1975, 430 pages. Overview and classification of technical net structures. Other topics: fibres and cables, mesh constructions of nets, cable connections, building with nets, nets from spiders and insects.

**IL 9:** Pneus in Nature and Technics, 1977, 336 pages. Report on the interdisciplinary cooperation of biologists and the IL that was researching the laws, which govern form development of the structural system of the pneu, with examples from nature and technical development. The structural system pneu is the essential basis for the world of forms of living nature.

**IL 10:** Grid Shells, 1974, 346 pages. Fundamentals and methods of form finding for grid shells, from hanging models to load bearing structures, architectural possibilities and applications.

**IL 11:** Lightweight and Energy Technics, 1978, 256 pages. Projects and development for cooling towers, hydraulic engineering structures, storage facilities, membranes in sewage treatment. Other topics: energy systems with sun, wind, and water and interior climate control



**IL 12:** Convertible Pneus, 1975, 186 pages. Ideas and examples of movable pneumatic systems. Contains a catalogue of pneus and form studies of pneumatic structures and diatom shells with examples of lightweight architecture in practice (tent structures in contemporary Europe).

**IL 13:** Multihalle Mannheim, 1978, 280 pages. Documentation of the 80,000 sq. ft. grid shell of the Federal Garden Exhibition Mannheim from the competition design to the complete building.

**IL 14:** Adaptable Architecture, 1975, 336 pages. Colloquium proceedings. Topics: adaptability in history, biology, medicine, architecture, and city planning, and the politics of adaptability.

**IL 15:** Lufthallenhandbuch, 1983, 438 pages. Architectural and structural design, cutting pattern, calculation, and manufacturing of air halls with annexes about material and codes.

**IL 16:** Tents, 1976, 160 pages. An extensive introduction into tent building practice and the construction of small and largest span tents. The book is an appreciation of the work of Peter Stromeyer.

**IL 17:** The work of Frei Otto and his Teams, 1978, 56 pages. Exhibition catalogue of the Museum of Modern Art, New York, in collaboration with the Institut für Auslandsbeziehungen Stuttgart. "The Work of Frei Otto" was initially shown from July 7 to October 4, 1971 under a tent structure specially developed for the exhibition, and circulated to several cities in the US and Canada. The exhibition structure was given to the University of Illinois in 1974 and used as an outdoor facility.

**IL 18:** Forming Bubbles, 1988, 400 pages. Experiments with liquid films in science, architecture and technics. The research was used for minimal ways, minimal surfaces and form finding models for tents, nets and air halls.

**IL 19:** Growing and Dividing Pneus, 1979, 166 pages. Pneumatic structures in nature and technics. About processes of generation and methods of form metamorphosis.

**IL 20:** Tasks, 1979, 350 pages. Problems and questions of further development and application of lightweight structures in research and practice.

**IL 21:** Form Force Mass 1 – Basics, 1979, 190 pages. Relationship of form, mass and efficiency of structures in nature and technics, with an annex about the aesthetics of lightweight structures.

**IL 22:** Form Force Mass 2 – Form, 1988, 96 pages. Proposal for a method for the order and description of forms, with photos of various forms.

**IL 23:** Form Force Mass 3 – Structure, 1992, 190 pages. Classification and order of structures related on their technical constructive characteristics.



**IL 24:** Form Force Mass 4 – The Lightweight Principle, 1998, 294 pages. Expense and optimization of structural elements and structures: an introduction into the Bis-Lambda-Method.

**IL 25:** Form Force Mass 5 – Experiments, 1990, 288 pages. Experiments on the dependence of form, force and mass. Processes of self-generation in biology and building. Formfinding and methods of modeling. The publication is based on the PhD-thesis of Siegfried Gaß.

**IL 26:** Nature and Architecture, 1980, 270 pages. Documentation of an international youth competition in collaboration with the Institut für Auslandsbeziehungen Stuttgart. The book contains pictures of 810 children from 24 countries, with comments by architects, ecologists and artists.

**IL 27:** Natural Building, 1981, 310 pages. Contributions to the symposium with the same name that took place in autumn 1979 at the IL. Among the topics were nature and society, self-help building, natural structures, and organic and ecological building.

**IL 28:** Diatoms 1 - Shells in nature and technics, 1985, 328 pages. Morphogenetic analysis and character synthesis of diatom valves by J.-G. Helmcke. Theoretical and experimental basics, processes of form genesis.

**IL 29:** The Tent Cities of the Hajj, 1980, 240 pages. The origin of the Hajj, the pilgrimage to Mekkah, its procedure of today and its urban planning problems. The book observes and interprets the individual tent, the tent city, and its organization.

**IL 30:** Sun & Shade (Vela, Toldos, Schattenzelte), 1984, 152 pages. Studies and considerations on the Roman Theatre Vela, the awnings (Toldos) of Sevilla, Schinkel's sheet metal tents and following buildings.

**IL 31:** Bamboo, 1985, 432 pages. Bamboo as building material, its traditional application in South-East-Asia (new edition of the thesis of Klaus Dunkelberg). Building with vegetal rods, new forms, structures and details.

**IL 32:** Lightweight in Architecture and Nature, 1983, 108 pages. Exhibition catalogue for "Natural Structure" at the Shusev Museum of Architecture in Moscow 1983. The exhibition presented research works and projects of the groups Biology and Building in West Germany and the USSR.

**IL 33:** Radiolaria, 1990, 320 pages. About shells in nature and technics: Radiolaria in Stereoscopic Micographs by J.-G. Helmcke, Processes of Form Generation by K. Bach.

**IL 34:** The Model, 1989, 272 pages. Study of Antoni Gaudi's hanging model and its reconstruction. The second topic is new light on the design of the Church of Colonia Güel, a PhD thesis by Jos Tomlow.

**IL 35:** Pneu and Bone, 1984. 256 pages. This issue investigates the structural system of the pneu in living nature: soft pneus, solide pneus, crustaceans, and bones.



**IL 36:** Subjective standpoints in architecture and science. Proceedings to the 20th anniversary of the IL, 1984, 232 pages.

**IL 37:** Ancient Architects, 1994, 184 pages. Frei Otto asks: What could the ancient master builders have invented? A contribution to the history of inventing structures.

**IL 38:** Diatomen 2, 2004.

**IL 39:** Non-Planned Settlements, 1992, 256 pages. The thesis of Eda Schaur describes characteristic features – path systems, surface subdivisions, effect of processes of self-organization on the formation of settlement structures. As a second step, the results are compared with generating structures in nature.

**IL 41:** Building with Intelligence, 1995, 272 pages. Aspects of a different building culture. Which new tasks are to be faced by planners, architects and engineers in order to meet the rapidly growing global problems?<sup>173</sup>

---

<sup>173</sup> Lista de publicações IL – [Consult. Março 2012]. Disponível em: WWW: <URL: <http://www.ludlow38.org/files/il-liste.pdf>>.

