

FABRICAÇÃO ROBÓTICA EM ARQUITETURA

Princípios, processos e aplicações

Dissertação para a conclusão do Mestrado Integrado em Arquitetura da FAUP

Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto

José Carlos Gomes Campos

Orientador: Professor Doutor José Pedro Sousa

Agradecimentos

Durante o meu percurso académico e, principalmente, durante esta fase de grande crescimento pessoal e profissional, pude sempre contar com pessoas especiais que me apoiaram e ajudaram a concretizar os meus objetivos.

Ao Professor José Pedro Sousa, pelo suporte e paciência na elaboração deste trabalho, além de me ter dado a oportunidade de participar no projeto de investigação IJUP e fazer parte da equipa de organização do evento, “*Future Traditions 2013*”.

Um especial agradecimento aos meus pais e irmãos, pelo apoio que me deram durante os estudos. Aos amigos que me acompanharam no curso e me deram força e coragem para terminar este trabalho.

Resumo

A crescente exploração da tecnologia robótica em vários centros de investigação e práticas de arquitetura, justifica a pertinência deste trabalho. Este procura desenvolver uma reflexão crítica sobre esta tecnologia, assim como alguns dos seus processos e aplicações até à data deste trabalho.

Depois de uma tentativa de introdução da robótica na construção, que ocorreu no Japão durante as décadas de 80 e 90, a integração desta tecnologia no campo da arquitetura ganhou um novo fôlego a partir de 2005. Resgatada por arquitetos que encontraram no braço robótico industrial um potencial aliado para a materialização das suas ideias mais elaboradas. Desde esse período, tem-se assistido a um aumento na investigação da robótica aplicada à arquitetura, que tem conduzido à concretização de vários projetos inovadores.

O objetivo desta dissertação concentra-se sobretudo no estudo da assimilação e utilização do braço robótico na arquitetura, identificando o percurso histórico desta tecnologia, bem como os seus princípios e processos fundamentais. Para além disso, pretende-se também refletir sobre a forma como este instrumento de trabalho está a ser acolhido na arquitetura e na construção, moldando as relações profissionais no mundo da construção.

Para este estudo, recorreu-se a uma seleção de casos de estudo, organizados de acordo com critérios de metodologia e manipulação do material, além da reconhecida qualidade arquitetónica que estes projetos atingiram. Procura-se assim perceber criticamente as vantagens que esta tecnologia pode oferecer à arquitetura, questionando o paradigma da produção em série e fortalecendo a emergência do conceito de Personalização em Série (*Mass-Customization*).

Palavras chave: Robótica; Processos construtivos; CAD/CAM; Customização em massa; Materialidade

Abstract

The increasing integration of robotic technologies in various research centres, as well as architecture practices, justifies the pertinence of this study, which seeks to develop a critical reflection about these technologies, as well as some of its processes and applications known up to this date.

After an attempt to introduce robotics in construction - which occurred in Japan during the late 80's and 90's - the exploration of this technology took a new breath after 2005, revived by architects who found in the industrial robotic arm a potential ally to materialize their most elaborate ideas. Since that period, investigations related to robotics applied to architecture have increased, which lead to the realization of several innovative projects.

The objective of this work will focus mainly on study of assimilation and use of the robotic arm in architecture, identifying the historical background of this technology, as well as its fundamental principles and processes. Furthermore, it is also intended to reflect on the ways in which this tool is being accepted in the fields of architecture and construction, shaping professional relations in the world of construction.

For this study, this dissertation uses a selection of case studies organized per criteria of methodology and material manipulation process, as well as the recognized architectural quality these projects have achieved. It thus intends to critically understand the advantages that this technology can bring to architecture, questioning the paradigm of mass production and strengthening the uprising concept of Mass-Customization.

Keywords: Robotics; Construction process; CAD/CAM; Mass customization; Materiality

Lista de Acrónimos

BIM	Modelagem da Informação da Construção (<i>Building Information Modeling</i>)
CAD	Desenho assistido por computador (<i>Computer Aided Design</i>)
CAE	Engenharia assistida por computador (<i>Computer Aided Engineering</i>)
CAM	Manufatura assistida por computador (<i>Computer Aided Manufacturing</i>)
CATIA	(<i>Computer Aided Three-dimensional Interactive Application</i>)
CC	(<i>Contour Crafting</i>)
CIM	Produção Integrada pelo Computador (<i>Computer-Integrated Manufacturing</i>)
CNC	Controlo numérico computadorizado (<i>Computerized Numerical Control</i>)
GMC	Controle de Movimento Genérico (<i>Generic Motion Control</i>)
SLA	Estereolitografia (<i>Stereolithography Apparatus</i>)

A presente dissertação encontra-se redigida pelo novo acordo ortográfico português, e no que concerne à tradução de citações bibliográficas que sustentam o texto, as mesmas são da inteira responsabilidade do autor deste trabalho.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação	2
1.2. Objetivo	4
1.3. Estrutura	5
1.4. Contributos	7
2. ARQUITECTURA NA ERA DIGITAL	11
2.1. Personalização	12
2.2. Tecnologia	16
2.2.1. Projeto Digital (CAD)	16
2.2.2. Fabricação Digital (CAM)	21
3. FABRICAÇÃO ROBÓTICA	27
3.1. Enquadramento histórico	28
3.1.1. A ideia de robô	28
3.1.2. O Robô na Construção	32
3.2. O Braço Robótico	38
3.2.1. Caracterização	38
3.2.2. Ferramentas	41
3.2.3. Funcionamento	43
3.3. Aplicações	49
3.3.1. Indústria	50
3.3.2. Arquitetura	53
4. CASOS DE ESTUDO	57
4.1. Processos aditivos	58
4.1.1. Gantenbein Vineyard (2006)	59
4.1.2. ICD/ITKE Research Pavilion (2012)	67
4.1.3. Análise	75
4.2. Processos subtrativos	76
4.2.1. Serpentine Pavilion (2005)	77
4.2.2. ICD/ITKE Research Pavilion (2010)	86
4.2.3. Análise	94
4.3. Processos Formativos	95
4.3.1. Smart Dynamic Casting (2012)	96
4.3.2. RoboFold 'ARUM' (2012)	100
4.3.3. Análise	106
5. CONCLUSÃO	109
BIBLIOGRAFIA	115
ÍNDICE DE FIGURAS	121

INTRODUÇÃO

1.

1. INTRODUÇÃO

Até recentemente, um tema como a fabricação robótica em arquitetura, como o que escolhi para este trabalho, levantaria dúvidas, ceticismo e até mesmo alguma polémica. Apesar destas considerações ainda não se terem dissipado por completo, suponho que podemos afirmar que houve uma mudança significativa nos últimos anos, em que a robótica começa a conquistar definitivamente o seu lugar na arquitetura como instrumento rigoroso e versátil de mediação com implicação ao nível concetual, estabelecendo uma ligação entre o mundo imaterial, virtual e a realidade física, material. Além disso, os robôs permitem reduzir o custo da manufatura, melhorar a qualidade do produto final e eliminar ou reduzir tarefas prejudiciais para os trabalhadores.

Por ser vulgarmente conotada com perda de mão-de-obra, pois a sua utilização iria significar a substituição de postos de trabalho, a robótica é ainda hoje depreciada pela sociedade. No entanto é uma tecnologia que está cada vez mais a afirmar-se, pois acarreta uma base digital abrangente para a construção, a qual *“desde o início da construção industrializada, foi objeto de muitos sonhos, mas poucas concretizações. A robótica permite não só recuperar o atraso tecnológico, mas também provocar mudanças fundamentais, através da conexão recíproca da realidade digital do computador com a realidade física da arquitetura”* (Gramazio, Kholer & Willmann, 2014:9)¹.

Sobre a introdução dos processos robotizados na arquitetura, os mesmos autores acrescentam que a arquitetura está a vivenciar uma segunda era digital, encontrando nesta a sua expressão contemporânea, assim como potencial para prosperar (ibidem).

Informática e arquitetura interagem e relacionam-se mutuamente, tornando o digital em concreto e tangível, com a robótica a operar uma reforma

¹*“The robotic brings forth a comprehensive digital basis for construction that, since the beginning of building industrialisation, has been more dreamed than realised. Beyond merely catching up on technology, the robot hereby provokes fundamental changes in the discipline: the reciprocal connection of the digital reality of the computer with the physical reality of architecture.”*

profunda na arquitetura, desenvolvendo nesta uma forma de materialização concebida para se ajustar à Era da informação.

A utilização de robôs em arquitetura permite “*interligar de forma “natural” as capacidades intrínsecas dos métodos de design digital com o espectro completo de materialização física*” (Gramazio, Kohler & Willmann, 2014:10)², capacidade que possibilita a criação de novos processos construtivos e materiais.

A área específica que me proponho estudar, tem dado largos passos na aplicação arquitetônica, com muitos progressos nos últimos anos. A democratização do computador e os presentes meios de divulgação e comunicação, aliados ao crescente desenvolvimento de software direcionado à arquitetura e design, torna cada vez mais facilitada a utilização de sistemas CIM (*Computer Integrated Manufacturing*) por arquitetos. Estes procuram constantemente novos revestimentos e estruturas não standardizados.

1.1. Motivação

Existe uma sedução no desenho paramétrico que desperta a curiosidade do observador. Este desafia a inteligência para a reflexão construtiva e para a lógica do desenho inerente à complexidade aparente do objeto, fachada ou estrutura com que nos deparamos. Um efeito coerente e aparentemente simples à primeira vista coloca uma série de questões mal nos debruçamos com atenção nos detalhes: Qual é a metodologia de desenho? Quais são os processos de construção?

² “*The robot turns out to be essential generic instrument, enabling us to ‘naturally connect the intrinsic capacities of digital design methods with the full spectrum of physical materialisation’.*”



O tema que será desenvolvido surge de um interesse pessoal, despertado em 2005, no primeiro encontro com uma obra em que reconheci existir uma geometria e execução, que ultrapassavam em muito o que conhecia até então. Estava um domingo de sol, no pico do Verão, e passeava por *Kensington Gardens*, em Londres. Junto à *Serpentine Gallery* deparei-me com um anúncio do pavilhão temporário desse ano, da autoria de Álvaro Siza Vieira e Eduardo Souto Moura, em parceria com a empresa de engenharia Arup e em particular, o engenheiro Cecil Balmond [Fig.1]. A julgar pelos nomes dos primeiros autores – pelo que conhecia das suas obras – a associação com o objeto que se me apresentava pela frente não seria a mais natural: uma espécie de aranhaço em madeira e acrílico, que se ajustava à paisagem de uma forma relaxada e coerente. À medida que me aproximava da estrutura apercebia-me da grande complexidade geométrica das peças de madeira, que se encaixavam umas nas outras e juntas formavam aquela forma uniforme e curvada – aparentemente frágil e leve, mas de sólida materialidade – sem apoios no seu interior, numa estrutura inteiramente autoportante [Fig.2]. Procurei compreender o método construtivo da estrutura com o parco conhecimento que tinha acerca dessa matéria.

Depois de um longo tempo de contemplação e reflexão, reconheci a minha dificuldade em percecionar a complexidade da estrutura. O entendimento de tal estrutura só viria a surgir cinco anos depois, na apresentação de uma aula de Geometria Construtiva pelo professor Doutor José Pedro Sousa, que nessa altura resumiu os temas que iriam ser abordados ao longo do

Figura 1
Serpentine Gallery - Pavilhão 2005. Vista do exterior, na aproximação do pavilhão

Figura 2
Serpentine Gallery - Pavilhão 2005. Vista do interior onde se pode observar a estrutura irregular em madeira

semestre, disciplina orientada em conjunto com o Professor Doutor João Pedro Xavier. Um crescente esclarecimento das capacidades das tecnologias digitais aplicadas à arquitetura começou a formar-se a partir desse momento. Desde então, o interesse na parametrização e processos de fabricação CAM levou-me a assistir a conferências e eventos relacionados com esta temática e, por fim, a participar na equipa de investigação de um projeto no âmbito de um programa de investigação jovem da UP-IJUP. Este trabalho teve como principal objetivo explorar as potencialidades de um braço robótico industrial, na montagem de blocos de cortiça.

Esta dissertação inscreve-se e culmina este percurso.

1.2. Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo principal estudar a integração e impacto das tecnologias de fabricação robótica no campo da arquitetura. Através desta investigação, pretende-se desvendar de que modo é que a robótica pode contribuir para o enriquecimento da prática, através das capacidades que essa tecnologia disponibiliza para o projeto e o fabrico em arquitetura.

Segundo Balaguer & Abderrahim (2008:3), a aplicação da robótica na arquitetura é relativamente recente, ao contrário do que aconteceu na indústria, onde é uma tecnologia cada vez mais corrente. A utilização desta tecnologia na construção é ainda muito limitada e focada sobretudo em processos experimentais e de investigação.

O crescente número de implementações de *robôs* em centros de investigação, assim como em algumas *startups* e processos de fabricação industrializados, aponta para uma rápida mudança da presença robótica na arquitetura. O desenvolvimento informático e a maior disponibilidade de *software* de modelação e parametrização foram também responsáveis por este regresso renovado dos robôs na investigação e arquitetura.

A preocupação deste trabalho não consiste em abordar um estilo ou uma tipologia arquitetónica específica, mas sim explorar o leque de opções que a utilização robótica na construção nos oferece e que poderão ser implementadas na arquitetura. Estas podem ter implicações na conceção

do projeto, na remodelada construção e experiência na arquitetura. Ao mesmo tempo, procura fazer uma leitura crítica da sua utilização e da forma como nos relacionamos com essa ferramenta.

Considerando a fabricação robótica como objeto de estudo deste trabalho, podemos identificar os seguintes temas gerais que nele são convocados:

1. Tecnologia robótica: *Fabricação*
2. Arquitetura: *Projeto e Construção*

Quando se fala em “tecnologia robótica”, podemos referir-nos a diversas tecnologias (ex. andróides, utensílios, etc.). Contudo, esta tese terá o braço robótico antropomórfico como máquina de eleição, devido à sua flexibilidade e resultados obtidos até à data deste trabalho, na aplicação em arquitetura, investigando a relação entre a prática e a ferramenta, além de uma profunda análise de alguns casos de estudo de algum valor para a arquitetura [Fig.3].

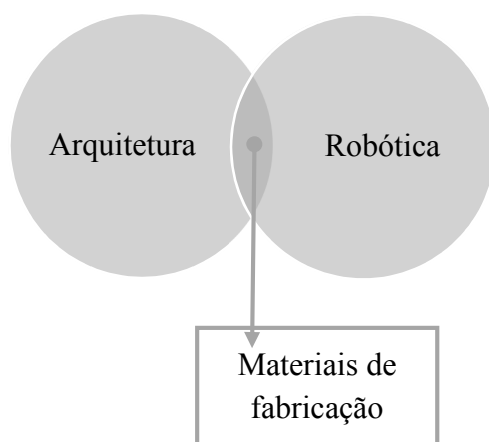


Figura 3
Diagrama de relação

1.3. Estrutura

O presente trabalho, vai desenvolver-se ao longo de cinco capítulos principais com subdivisões relacionadas, tendo sempre como objetivo maior clareza na leitura.

Capítulo 1. – É relativo à introdução, aí será feita uma exposição acerca do motivo que me levou a optar por esta temática, assim como o âmbito do trabalho, os objetivos do mesmo e a metodologia a adotar.

Capítulo 2. – Será apresentada a contextualização deste tema, serão também abordados os avanços tecnológicos vivenciados na era digital.

Capítulo 3. – Apresentação da Fabricação Robótica, nomeadamente a tecnologia associada a esta, e sua aplicação após o necessário enquadramento histórico.

Capítulo 4 - Os casos de estudo agrupados pelos processos, serão submetidos a uma reflexão individual e comparativa, procurando desenvolver uma reflexão crítica sobre o processo, técnica, materialidade e evolução. Para isso, selecionou-se um conjunto de casos de estudo agrupados pelo tipo de processo de materialização implícito na fabricação: Adição, subtração e formação:

- *Adição*
 - Gantenbein Vineyard (2006)
 - ICD/ITKE Pavilion (2012)
- *Subtração*
 - Serpentine Pavilion (2005)
 - ICD/ITKE Pavilion (2010)
- *Formação*
 - Smart Dynamic Casting (2012)
 - RoboFold 'ARUM' (2012)

Capítulo 5 - Corresponde à conclusão, aí serão expostas as considerações finais acerca do exposto no corpo da dissertação, refletindo entre outras questões, acerca da universalidade e futuro da tecnologia.

1.4. Contributos

Ao abordar o estudo da tecnologia robótica na arquitetura, este trabalho pretende contribuir para o conhecimento e divulgação de um tema em ascensão no panorama global da investigação e da prática, mas que ainda é pouco conhecido no meio local em que esta dissertação se inscreve.

Através da metodologia seguida, seleccionou-se um conjunto de casos de estudo que se espera serem suficientemente críticos e claros e que possam contribuir para um entendimento e discussão sobre as potencialidades destas tecnologias na arquitetura.

A um outro nível, a realização deste trabalho permitiu contactar com um tema de interesse pessoal. Convocando experiências práticas realizadas durante o curso de arquitetura e da participação em trabalhos de investigação, este trabalho permitiu a consolidação de conhecimentos e competências práticas na área da robótica na arquitetura.

ARQUITECTURA NA ERA DIGITAL

2.

2. ARQUITECTURA NA ERA DIGITAL

É comum referir-se ao momento que atravessamos atualmente como a Era Digital. Período também definido como “era da informação”³. Este período iniciou-se em meados do século XX, e é marcado por grandes avanços nas tecnologias da informação e comunicação, que a arquitetura abraçou. O ensino e prática da arquitetura sofreu mudanças significativas por influência destas novas tecnologias, tendo interferido significativamente na forma como projetamos e construímos.

“A era digital tem reconfigurado radicalmente a relação entre a concepção e produção, criando uma ligação direta entre o que pode ser concebido e construído. Os projetos de construção de hoje não são apenas nascidos digitalmente, mas eles também são realizados digitalmente através de tecnologias de fabricação “file-to-factory” processos de controlo numérico computado (CNC).”
(Kolarevic, 2003:46)⁴

Com o tempo, o computador tornou-se genérico, amplamente disponível e com, cada vez maior, capacidade de processamento. Este fator aliado aos avanços ao nível das capacidades do software, oferece-nos hoje um meio para experimentar uma maior liberdade criativa e realização física do que idealizamos.

Sobre este período, a Era Digital, serão apresentados e discutidos, em seguida, alguns conceitos chave relativos à disciplina da arquitetura e tecnologia.

³Segundo James W. Marcum (2006:13), a “era da informação” (*Age of information*) foi definida por Daniel Bell na publicação “*The coming of Post-Industrial Society*” (1973), precedendo à “era da industrialização”.

⁴“*The digital age has radically reconfigured the relationship between conception and production, creating a direct link between what can be conceived and what can be constructed. Building projects today are not only born out digitally, but they are also realized digitally through “file-to-factory” processes of computer numerically controlled (CNC) fabrication technologies.*”

2.1. Personalização

Pode-se afirmar que a natureza do homem não consiste na busca de uma uniformização do gosto e vontade em relação ao que o rodeia. O facto de frequentemente possuir objetos iguais, utilizar dispositivos iguais, ou conduzir um automóvel igual, não resulta da vontade individual, mas das lógicas de produção, condicionadas por custos de produção e outros fatores que nos limitam as opções. Essa conclusão é, de certa forma, justificada pela história da oposição à industrialização e tentativas de uniformização na arquitetura.

Pré-Digital

Até ao início da revolução industrial, o Homem fabricava objetos personalizados, cuja qualidade final dependia em grande parte do talento do artesão. Atualmente, essas formas de fabrico são muito valorizadas, por vários motivos, mas principalmente devido ao impacto da industrialização. O início da revolução industrial introduziu na sociedade a lógica da produção em série, como modo de alcançar quantidade e economia na produção. O mercado passou então a ser marcado pela predominância de produtos iguais (standard), manufaturados industrialmente. Também na arquitetura esses artigos encontraram o seu lugar, apesar das críticas geradas. Por exemplo, os autores do movimento *Arts and Crafts*⁵ condenavam vivamente a aparição desses produtos [Fig. 4], pela ameaça que a tradição construtiva sofria, como defendia Gottfried Semper segundo Frampton (2003:129).

⁵*Arts & Crafts* foi um movimento estético que surgiu em Inglaterra, durante a segunda metade do século XIX. “Defendia a produção de artesanato criativo como alternativa à mecanização e à produção em massa, assim como o fim da distinção entre os conceitos de artesão e artista. Opôs-se aos avanços da indústria e pretendia imprimir em móveis e objetos o traço do artesão-artista, que mais tarde seria conhecido como designer. Um dos seus grandes defensores foi o romântico John Ruskin (1819-1900). Escritor, crítico de arte e sociólogo, Ruskin preconizava que o trabalho dos construtores e artífices era um valor a preservar” (Luso, Lourenço e Almeida, 2004: 37).

**Figura4**

Mansão Wightwick, West Midlands, England, exemplar do movimento *Arts and Crafts*

A inquietude que deu origem ao movimento *Arts and Crafts*, também se fez sentir na Alemanha, sendo motivo de preocupação dos “membros da Deutsche Werkbund, pela separação entre norma e forma, entre tipo e individualidade” (Frampton 2003:134).

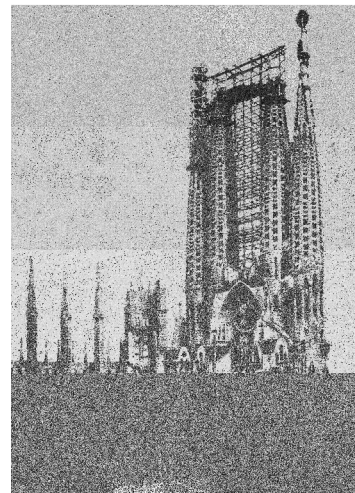
O século XX continuou a ser pautado por manifestações contra a uniformização. Assistimos à ascensão e à queda do Congresso Internacional da Arquitetura Moderna CIAM, que se iniciou com o primeiro manifesto em 1928 e, “com uma visão mais política e económica, que apelava à adoção universal de métodos racionais de produção” (Frampton 2003:327). Esta visão muito limitada continuou até às primeiras manifestações iniciadas com a “carta de Atenas”. Com o fim da guerra, o CIAM foi perdendo força, e no IX congresso de 1953, sob liderança de Alison e Peter Smithson, com Aldo Van Eyck, questionaram a “carta de Atenas”, o que levaria à extinção oficial do Congresso no ano de 1956 em Dubronik, segundo Frampton (2003:330). Entre os argumentos que levaram à queda dos CIAM, destaca-se a vontade de exaltar a identidade local e a personalização na arquitetura.

Ao longo do século XX, podemos encontrar vários testemunhos de artistas e arquitetos que se interessaram pelo projeto de formas de grande complexidade. Um bom exemplo disso, é o edifício inacabado da Sagrada Família⁶, que ainda hoje representa um grande desafio para arquitetos, engenheiros e construtores.

Outros projetos não chegaram a ser construídos apesar da escala reduzida, como é o caso da *Endless House* [Fig.5] de Frederick Kiesler, de 1959.

⁶ A basílica e templo da Sagrada Família, localizada em Barcelona, foi idealizada pelo arquiteto espanhol Antoni Gaudí (1852-1926) que assumiu o projeto em 1883, que se tinha iniciado em 1882.

Estes procuravam fugir à tipologia instalada, oferecendo uma solução que tentava adequar-se ao Homem e a todas as suas dimensões e exigências vivas, funcionais e imagéticas como defende Harald Kloft, afirmando que “*para Kiesler, a forma não segue a função: a forma segue a visão e visão segue realidade.*”⁷ (Kloft, 2004:138).



Como exemplo construído de formas irregulares numa Era pré-digital, destaca-se a inacabada Sagrada Família em Barcelona [Fig.6], que atualmente, ainda se mantém em construção, embora com abordagens de desenho e fabrico bem distintas das iniciais, para obter as mesmas formas.

Figura 5
Frederick Kiesler e a maquete da sua *Endless House* (1959)

Outro exemplo construído de formas irregulares na Era pré-digital, é a igreja de *Notre-Dame de Haut* em Ronchamp, projetada em 1954 por Le Corbusier. Esta obra é singular nas formas curvas das paredes e cobertura [Fig.7]. Contudo, estes exemplares são apenas uma pequena amostra da expressão da vontade do arquiteto em inovar, procurando a singularidade ou personalização.

Figura 6
Sagrada família em Barcelona (1929)

Alguns arquitetos dos anos 60 e 70, com uma visão mais utópica, como o caso dos Archigram [Fig.8], Metabolism, ou Superstudio foram fonte de inspiração para arquitetos mais ousados. Estes movimentos ofereceram um campo fértil de ideias, das quais surgiram algumas realizações, tanto em formas de habitar, como estruturas e materiais, como é referido por Kolarevic (2003:6).

⁷“*For Kiesler, form does not follow function: form follows vision and vision follows reality.*”

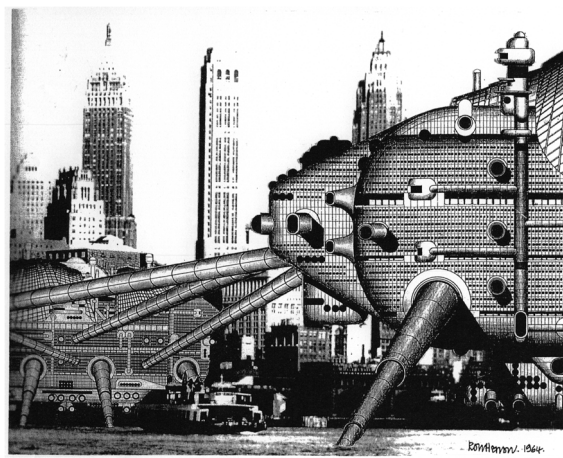


Figura 7
(esquerda) Igreja de Notre-Dame-de-Haut, Ronchamp (1955)

Figura 8
(direita) *Walking City*, Archigram (1964)

Era Digital

Os avanços tecnológicos que permitiram a utilização da tecnologia digital na arquitetura e manufaturação com recurso a tecnologia CAM, proporcionaram o *Non-Standard Architecture*”, uma palavra que foi tomada por empréstimo” ao universo informático segundo Frédéric Migayrou (2003:13), e que “induz a uma desregulação da interpretação da fundação moderna... É, ao mesmo tempo, uma declaração de pesquisa arquitetónica induzida pela generalização da tecnologia digital, assim como um estado de mutação que se compromete a definir uma nova identidade da arquitetura e seus negócios”⁸.

Entre dezembro de 2003 e março de 2004, realizou-se uma exposição no centro *Georges Pompidou* em Paris, intitulada *Non-Standard Architecture* a qual “procurava fazer um balanço das mudanças sociais, políticas e económicas introduzidas pela implementação generalizada de uma produção “Non-Standard” de arquitetura, design e políticas territoriais e

⁸ “...et induit une dérégulation de l’interprétation de la fondation moderne. “Architectures non standard” est tout à la fois un constat des recherches architecturales induites par la généralisation du numérique, et un état de la mutation qui engagera à terme la définition d’une nouvelle identité de l’architecture et de ses métiers.”

urbanas”⁹ (Frédéric Migayrou, 2003:13). A pertinência de tal exposição expôs as potencialidades do que se produzia na altura com recurso à tecnologia de desenho e fabrico digital.

Deste modo, a arquitetura passou a ser contada (em parte), através dos avanços tecnológicos a que assistimos nas últimas décadas.

2.2. Tecnologia

O crescente avanço a que temos assistido das tecnologias de informação e comunicação têm contribuído para a multiplicação no desenvolvimento e partilha de conhecimento nas várias vertentes disciplinares. Este fator, tem também contribuído para avanços significativos no desenvolvimento dos métodos de representação e fabrico na arquitetura, que viu o processo de projeto ser progressivamente transferido para o computador, com as tecnologias a serem cada vez mais acessíveis.

Os recentes desenvolvimentos de tecnologias CAD/CAM apresentam-nos como sistemas cada vez mais flexíveis e intuitivos, e economicamente acessíveis devido à queda do seu custo. Tais condições permitem-nos adivinhar a continuação da progressão destas tecnologias e da sua interferência na arquitetura. Em seguida, descrevem-se alguns conceitos relevantes associados às possibilidades de desenho e à materialização digital.

2.2.1. Projeto Digital (CAD)

A evolução dos métodos de representação em arquitetura, pode ser em parte contada pelos desafios construtivos que alguns edifícios enfrentaram, como é o caso da casa da Ópera de Sidney onde foi aplicada a tecnologia de Engenharia Assistida por Computador (CAE).

⁹ “L’exposition “Architectures non standard” cherche à prendre la mesure des mutations sociales, économiques et politiques induites par une mise en oeuvre généralisée d’une production “non standard” de l’architecture, du design, et des politiques territoriales et urbaines”

Segundo José Pedro Sousa (2010:27), a casa da Ópera de Sidney projetada por Jørn Utzon e construída entre 1959 e 1973 [Fig.9] é o edifício que marca o início da aplicação de tecnologias digitais no campo da construção. A conceção deste projeto, surgiu num período de debate entre os processos de cálculo convencionais e o digital, tendo os engenheiros da Ove Arup, utilizado processos computacionais para lidar com problemas levantados por questões formais do projeto.



Figura 9
Casa da Ópera - Sydney
(1973)

Existe um outro edifício que ainda hoje se encontra em fase de construção e que se falasse nos poderia contar como ninguém, a história da transição do desenho para representação digital e a sua articulação com os processos de fabrico. Idealizada por Antoni Gaudí, o templo da Sagrada Família em Barcelona tem constituído um grande desafio aos arquitetos, engenheiros e outras equipas envolvidas na construção. Durante a construção deste edifício, o desenho transitou do estirador para o computador, evoluindo para a representação tridimensional, e posteriormente adotando processos paramétricos.

A construção complexa desta Basílica, aliada ao pouco material que Antoni Gaudi deixou, devido à “*destruição do seu workshop na obra, por vândalos durante a guerra civil espanhola entre 1936-1939*”¹⁰ (Burry, 2012:28), tem representado um grande desafio à exploração do desenho que dê continuidade da forma mais fiel possível do material sobrevivente [Fig.10]. Um dos responsáveis por resolver esse “puzzle” tem sido o arquiteto Mark Burry que, com a sua equipa, explora a geometria por detrás

¹⁰ “The third presumed deficit is that Gaudi's working method was obscure and whatever plans he left were burnt during the destruction of his workshop based on site by vandals during the 1936-1939 Spanish Civil War.”

dos desenhos e modelos que sobreviveram, utilizando *software* CAD e desenho paramétrico. Segundo ele, a sua aventura com a programação¹¹ (*scripting*) começou em 1992 enquanto investigava os modelos de gesso sobreviventes de Gaudi para igreja da Sagrada Família em Barcelona.

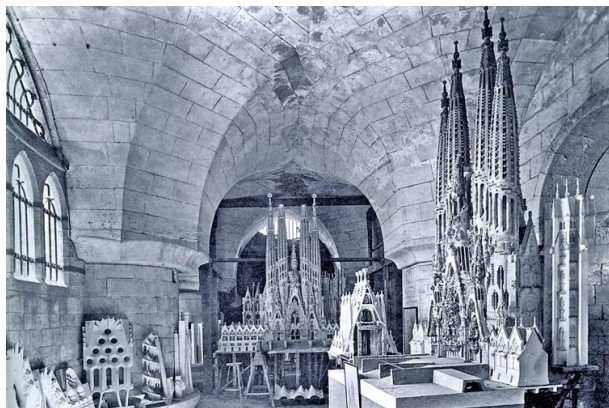


Figura 10
Oficina de maquetas da
Sagrada Família (1917)

Parametrização

A utilização do desenho paramétrico, por vezes, referido como geometria associativa veio facilitar o desenvolvimento de projetos contemplando a personalização geométrica, dando expressão ao conceito de *mass customization*¹², termo utilizado para descrever a produção em série de objetos diferentes uns dos outros. Tal como define Bernard Cachet “*agora, podemos prever sistemas de segunda geração em que os objetos não são mais desenhados, mas calculados*” (Cachet, 1995:88)¹³. O autor definiu objetos variáveis criados a partir de superfícies como “*subjectiles*” e criados a partir de volumes como “*objectiles*, identificando duas possibilidades: uma, em que os modos de conceção permitiriam que formas complexas fossem projetadas, algo de difícil representação por métodos

¹¹*Scripting*, é um termo utilizado para definição de programação de computador em vários níveis. Segundo Mark Burry (2012:8), *Scripting* é a capacidade oferecida por quase todos os pacotes de software de design que permitem ao usuário adaptar, customizar ou completamente reconfigurar o software espelhando as próprias predileções e modos de trabalhar.

¹²*Mass Customization*, é o termo dado à produção de elementos diversificados, contrário à produção em massa. Foi um termo utilizado por Stanley M. Davis na edição *Future Perfect* em 1987, na qual redefiniu a fabricação de produtos individuais, utilizando os métodos de produção em massa.

¹³“*Now, we can envisage second-generation systems in which objects are no longer designed but calculated.*”

tradicionais de desenho, e a segunda, em que estes avanços lançariam as bases para um modo de produção *non-standard*. (Cachet, 1995:88). Estas presunções têm progressivamente realizado como podemos constatar em diversos trabalhos, inclusive os que constituem o objeto de estudo deste trabalho.

Estes processos de desenho provocaram mudanças em várias áreas, tanto na conceção como no fabrico, e na relação entre estas duas fases. Embora, a utilização de tais processos possa ter complicado o fabrico e construção, podemos encontrar exemplos em que simplificou e enriqueceu os processos, como o *Serpentine pavilion* de 2005.

*“Para o observador, a tensão mede o comportamento intuitivamente compreensível do material e da lógica do desenho, que poderá não ser imediatamente óbvio. A lógica pode ser detetada, mas não necessariamente explicada. Esta obscuridade seduz os nossos sentidos, enviando-nos para uma descoberta e convida-nos a relaxar e refletir.”*¹⁴(Gramazio & Kohler, 2008: 7)

No desenho paramétrico, o utilizador relaciona-se com um conjunto de variáveis e constrangimentos. Codificadas em software (ex: Grasshopper) ou em código (ex: scripting) a geometria do desenho ajusta-se de acordo com o processamento dessas variáveis que podemos controlar facilmente, permitindo ao utilizador a visualização constante das alterações. Entre várias opções, permitem introduzir e ajustar parâmetros de escala, orientação e forma para os vários elementos que compõem a estrutura no seu estado digital. A partir dessa informação digital podem-se definir diretamente as operações de fabrico posteriores, convertendo essa informação em instruções de comunicação com ferramentas CNC¹⁵.

¹⁴“For the observer, a tension spans the intuitively understandable behaviour of a material and the design logic, which may not be immediately obvious. The logic can be sensed, but not necessarily explained. This obscurity seduces our senses, sending them on a voyage of discovery and inviting us to linger and reflect.”

¹⁵ Esta breve descrição da capacidade do *software*, pode variar de um sistema para outro contudo, importa realçar também a forma como o utilizador se relaciona com ele.

Modelação da Informação da Construção (BIM)

Nas últimas décadas temos assistido a uma crescente implementação de infraestruturas nos edifícios públicos ou privados. Atualmente, além do projeto de arquitetura e estrutura, também poderão ser necessários estudos e projetos de: Abastecimento de água; saneamento; elétrico; comunicações; ventilação; segurança contra incêndios, e outros. Alguns destes projetos requerem cálculos muito específicos, mas, na maioria dos casos, são indispensáveis.

Além dos diferentes projetos e estudos, também as técnicas construtivas evoluíram muito, conjuntamente com a grande diversidade de materiais e produtos para a construção. Além disso, geralmente há necessidade de cálculos de custos e ajustes ao projeto com vista à redução destes. Para a produção e gestão de toda esta informação, ou parte dela, surgiu o *Building Information Modeling* (BIM) que significa “Modelação da Informação da Construção”. O conceito remonta a 1962, quando Douglas Engelbart publicou um artigo em que dá a sua visão do arquiteto do futuro.

“o arquiteto depois começa a digitar uma série de especificações e dados... Ele sempre recorda do “notário” suas listas de trabalho de especificações e considerações para se referir a elas, modificá-las ou adicioná-las. Estas listas crescem em uma estrutura cada vez mais interligada e detalhada, o que representa o pensamento de maturação por trás do projeto real.”¹⁶(ENGELBART.net).

Atualmente, seria muito difícil articular toda a informação sem a ferramenta CAD, principalmente para projetos de grande envergadura, como um aeroporto, um hospital ou um hotel. Além de ser uma ferramenta indispensável na representação das ideias, o *software* CAD oferece-nos capacidades de desenho, como a parametrização, que seriam quase impossíveis de ser realizados por processos rudimentares. Com o desenvolvimento de *software* CAD, que veio progressivamente, permitir

¹⁶ “...the architect next begins to enter a series of specifications and data... He often recalls from the “clerk” his working lists of specifications and considerations to refer to them, modify them, or add to them. These lists grow into an evermore-detailed, interlinked structure, which represents the maturing thought behind the actual design.”

uma visualização tridimensional mais realista, e criar a oportunidade para a integração de mais informação no modelo virtual, como a cor, o material e, gradualmente, mais informação.

Atualmente, o software BIM é uma plataforma digital de colaboração em rede. Mais que um software, é uma metodologia de criação e gestão de informação necessária para a construção, desde o processo criativo à execução e até manutenção da mesma. Contudo, devido à liberdade inerente aos processos de desenho manual e à flexibilidade dos processos de desenho paramétrico, a conceção através de BIM é, para muitos arquitetos, um aspeto problemático desta metodologia.

2.2.2. Fabricação Digital (CAM)

O progressivo avanço nas tecnologias de processamento de dados, e o *software* de representação CAD, despertou interesse em tecnologia de fabrico computadorizado, que viria a possibilitar a personalização digital. Esse desejo levou ao desenvolvimento de tecnologias de Controlo Numérico por Computador (CNC), efetuando a ponte entre o desenho digital e o fabrico através de processos de Manufatura Assistida por Computador (CAM), hoje cunhado como fabricação digital. Estas tecnologias de fabrico digital, são os instrumentos que possibilitam materializar as ideias de personalização referidas anteriormente.

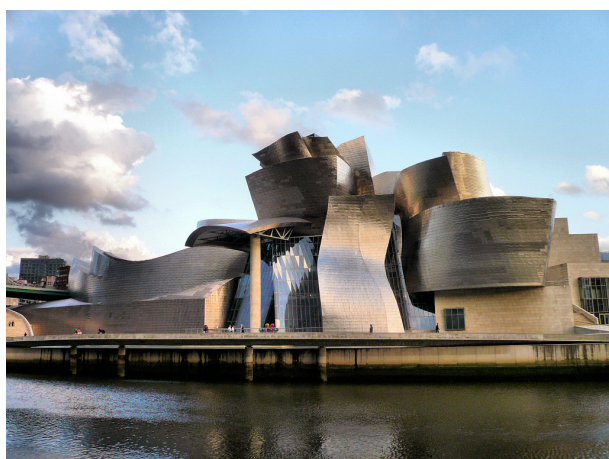


Figura 11
Museu Guggenheim de Bilbao
de Gehry Partners (1997)

Branko Kolarevic refere o Museu Guggenheim de Bilbao construído entre 1991 e 1997, da autoria do arquiteto americano Frank Gehry [Fig.11], como um marco no campo da utilização de tecnologias digitais pelo relevo que teve na utilização de fabricação CAD/CAM. Como aponta

Kolarevic, “o museu Guggenheim em Bilbao capta o espírito da revolução da informação digital, cujas consequências para a indústria da construção são comparáveis à escala similar da revolução industrial”¹⁷ (Kolarevic, 2003:2).

Segundo Liu, “desde finais dos anos 80 que o atelier Gehry & Partners se foca em métodos de fabricação de chapa metálica para atingir uma maior liberdade na construção da forma”¹⁸ (Liu, 2009:13). Esta procura, aliada ao desenho desenvolvido com o software CATIA (*Computer Aided Three-dimensional Interactive Application*) possibilitou a exploração formal e livre em três dimensões.



Figura 12
Museu Guggenheim de Bilbao - O museu é revestido em titânio, vidro e calcário

A relevância de alguns destes edifícios demarcou e revolucionou o lugar onde se implantaram, como a Sagrada Família e, mais recentemente, o museu *Guggenheim* de Bilbao [Fig.12]. Considera-se que depois da construção do *Guggenheim*, a dimensão da arquitetura não voltou a ser a

¹⁷“Frank Gehry’s Guggenheim Museum in Bilbao is probably the best known example that captures the zeitgeist of the digital information revolution, whose consequences for the building industry are likely to be on a scale similar to those of the industrial revolution.”

¹⁸“From late 1980s, Gehry & Partners have been focusing on fabrication methods of fabricating metal sheet panels for freeform construction.”

mesma, em consequência do chamado “efeito de Bilbao”¹⁹. O desejo de igualar este impacto levou vários arquitetos, e clientes, a desenvolver projetos únicos e ambiciosos, que forçaram a investigação a acompanhar as respetivas necessidades tecnológicas ao nível da representação e da construção.

Atualmente existe uma grande variedade de ferramentas de fabricação CNC em centros de investigação e na indústria, suportando as novas abordagens de produção. De acordo com a forma como manipulam o material, estes processos de fabricação digital podem ser organizados em:

- *Aditivos*
Impressão 3D, *STL (Estereolitografia)*, *SLS (Sinterização Seletiva por Laser)*

- *Subtrativos*
Fresagem, Corte a Laser, Corte a Jato de água, Serração, Corte a Plasma, Perfuração

- *Formativos*
Moldagem, Quinagem, Prensa, Extrusão, Estampagem

Estas tecnologias de fabricação, não só permitem a produção de protótipos e maquetas, como também componentes finais destinados à construção dos edifícios.

A produção de formas irregulares na arquitetura através de software de modelação, dificilmente se tornaria realidade se as tecnologias de fabricação não tivessem acompanhado as possibilidades de representação assistidas pelo computador.

A fabricação com tecnologia CAM permitiu facilitar a viabilização da produção de elementos de geometria complexa ou variável desenhados digitalmente. Esta possibilidade de maior intervenção na produção material

¹⁹ Como defende Hal Foster, “*the Bilbao Effect*” é uma expressão que se popularizou, pelo impacto que teve na forma de idealizar edifícios com o objetivo de causar espanto e atração ao local onde se implantam e gerando uma revitalização urbanística, como defende (Foster2003:42).

é enfatizada por Gramazio e Kohler através do seu conceito de “materialidade digital” [Fig.13].

“O termo Digital Materiality é usado para descrever uma transformação emergente na expressão da arquitetura. A materialidade tem vindo a ser enriquecida com características digitais”²⁰ (Gramazio & Kohler, 2008:7).



Figura 13

Pré-fabrico de betão com superfície-e “enriquecida” com recurso ao desenho e fabrico digital. Gramazio & Kohler, Interference Cube, Basel, (2003)

Dentro das diferentes tecnologias de fabricação digital, destaca-se atualmente a tecnologia robótica, recentemente adotada na arquitetura. Embora já seja muito comum noutras áreas, esta tecnologia tem captado a atenção de arquitetos por ser uma tecnologia avançada, rigorosa, flexível e diversificada no que diz respeito às suas aplicações. O mesmo equipamento permite lidar com diferentes materiais e operações de fabricação através da adaptação das ferramentas adequadas. Para além disso, o seu funcionamento pode ser assistido através da integração de outros dispositivos auxiliares, como sensores, configurando o que se pode chamar de processos automatizados inteligentes. Foram estes motivos que levaram à escolha deste tema para a realização deste trabalho, o qual será analisado com maior cuidado no próximo capítulo

²⁰“We use the term digital materiality to describe an emergent transformation in the expression of architecture. Materiality is increasingly being enriched with digital characteristics”.

FABRICAÇÃO ROBÓTICA

3.

3. FABRICAÇÃO ROBÓTICA

A robótica é a tecnologia de fabricação digital mais avançada na atualidade pela sua versatilidade na execução de tarefas com elevada precisão. Recentemente tem despertado um interesse crescente no campo disciplinar da arquitetura pela possibilidade de exploração de outras lógicas de produção, como a personalização em série.

Para uma maior compreensão da integração desta tecnologia na arquitetura, é importante que se faça uma breve análise sobre a história desta tecnologia, desde algumas referências a antecedentes à sua integração na indústria e, mais recentemente, na arquitetura.

A utilização do robot industrial antropomórfico, também chamado de braço robótico pela sua configuração, tem sido adotado na arquitetura seguindo o exemplo de outras indústrias. Contudo, devido à especificidade da arquitetura, o modo de apropriação e utilização tem sido ligeiramente diferente. Por este motivo, importa entender quais as características relevantes para a utilização desta tecnologia na arquitetura, com maior enfoque nas capacidades gerais e não tanto nas suas características mais técnicas.

Entendida a relevância para a arquitetura, torna-se pertinente mapear a variedade de aplicações desta tecnologia e em que situações pode estar presente.

3.1. Enquadramento histórico

A forma como a tecnologia robótica chegou à atualidade é resultado de períodos de carências, desejos e invenções. Contudo, o modo como nos relacionamos com essa tecnologia nem sempre foi unânime. Se perguntarmos hoje a alguém o que pensa sobre a robótica, existe uma boa probabilidade de a resposta se associar a filmes como *Star Wars*, ou *I, Robot*²¹, entre outros. O receio de as máquinas dominarem o mundo, nas visões mais utópicas, ou sobretudo, da robótica acabar com postos de trabalho numa visão mais real, são ainda sentimentos que prevalecem na sociedade.

Para a desmistificação de algumas ideias em redor desta tecnologia, é importante proceder a um breve estudo histórico desde as suas origens até ao momento atual onde decorre uma integração na arquitetura, procurando identificar alguns marcos importantes neste percurso.

3.1.1. A ideia de robô

A ambição de o Homem ter um ajudante já existe há muito tempo. No Império Médio no Egito, eram colocados *ushabtis*²² [Fig.14] nos túmulos de figuras importantes para os servir e ajudar na vida após a morte, e para a realização de tarefas manuais segundo Zaki (2008:39).

A história está repleta de inventos de máquinas para ajudar o Homem na execução de tarefas, funções, ou a superar as próprias limitações. Além destas descobertas, foi surgindo a vontade de dotar as ferramentas e outros

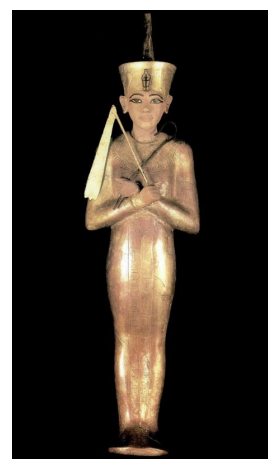


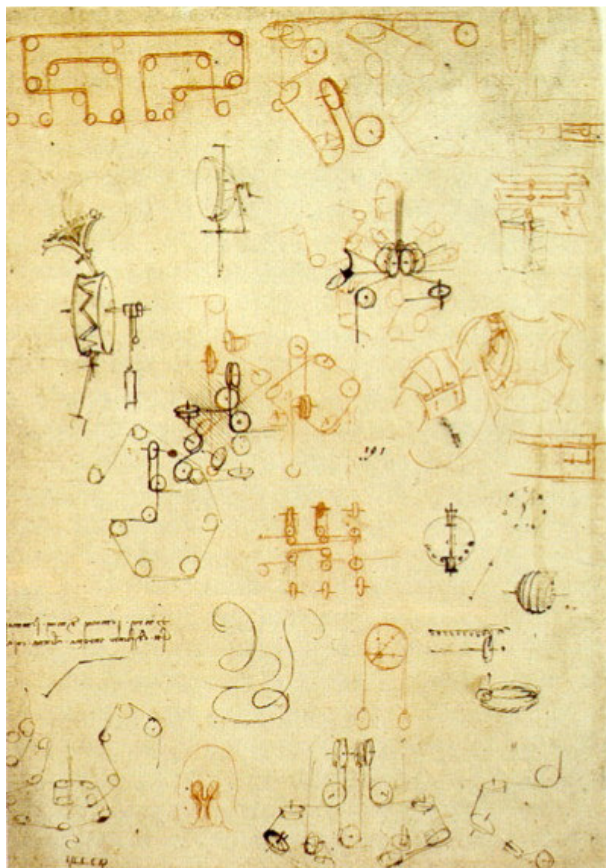
Figura 14
Um dos 413 Ushabtis de Tutankhamun encontrados no seu túmulo

²¹ *I, Robot* é um título de uma série de nove curtas histórias de ficção científica escritas por entre 1940 e 1950, por Isaac Asimov, e que foram mais tarde compiladas num livro. A ação destas histórias passa-se no século XXI e o tema das mesmas contempla a interação entre os seres humanos e os robôs, detentores de uma inteligência humana e fortes valores morais. A obra de Asimov foi Objeto de várias dramatizações para televisão, tendo sido adaptada também para o cinema, em 2004, num filme protagonizado por Will Smith.

²² Chamados de *ushabtis* ou *shabtis*. *Ushabti* é um nome que deriva da palavra *ushab* que significa “para responder, ou a resposta” representavam os servidores, que respondiam ao chamado dos deuses para realizar trabalhos agrícolas nas áreas de *Laru* ou paraíso. (Zaki, 2008:56)

dispositivos de um funcionamento automático, como os “relógios nas igrejas medievais antes do século XV” (Nof, 2009:26).

Um dos mais notáveis autómatos com um elevado nível de sofisticação para o período, foi desenhado por Leonardo da Vinci durante o Renascimento²³, tratava-se de um autômato que tocava tambor [Fig.15].



Apesar das várias tecnologias inventadas até início do século XX que apontavam para a tecnologia robótica, só em 1920 surgiu o termo Robot, através da publicação para uma peça de teatro, R.U.R., escrita por Karel Čapek com a contribuição de seu irmão Josef Čapek [Fig.16]. Esta peça é desenvolvida à volta de humanoides que ajudam o Homem. Robô, tem origem na palavra checa “*Robota*” que significa trabalho forçado. (Gramazio, Kohler & Wilmann, 2014:110). Este conceito manteve-se até



Figura 15
(esquerda) Fo-glio 579r, del Codice Atlantico, Construção do Robô de Leonardo da Vinci

Figura 16
R.U.R. é uma peça de teatro sobre ficção científica onde aparece pela primeira vez a palavra “robot”

²³ Os esboços do robô de Leonardo da Vinci constavam de um caderno de notas, datado de 1495 e redescoberto em 1950. Recentes investigações estabeleceram que este era um mecanismo funcional com energia própria, de notável sofisticação. Leonardo exibiu o seu “robô” num evento patrocinado por Ludovico Sforza, na corte de Milão, em 1495. (Rosheim, 2006: 69).

à atualidade, permitindo enquadrar os vários desenvolvimentos tecnológicos.

Com o avanço da industrialização no final do século XIX, os postos de trabalho começaram a caracterizar-se pelo desempenho de tarefas muito repetitivas e cansativas. A linha de montagem introduzida por Henry Ford é um exemplo do impacto da industrialização na configuração e desempenho do trabalho humano. Essas condições levaram à ideia de conceber tecnologia autónoma que libertasse o homem dessas tarefas.

Em 1954, George C. Devol patenteou uma tecnologia chamada “*universal automation*” que se tornou a base de uma companhia chamada *Unimation*, e que viria a tornar-se no maior fabricante de robôs industriais da época [Fig.17]. O primeiro robô industrial *Unimation* que iria servir como máquina de fundição, foi vendido para a Ford Motor Corporation em 1961 (Hoang, 2005: 31).

O sucesso do *unimate* partiu do principio de três fundamentos (Engelberger, 1976 apud, Nof, 1999:5):

- *Existir uma necessidade reconhecida.*
- *Disponibilidade de profissionais competentes e tecnologia apropriada.*
- *Dispor de apoio financeiro adequado.*

Esse robô industrial introduzido na GM *Ternstedt* em *Trenton NJ*, tinha apenas 5 graus de liberdade de movimento e dois eixos. Foi, no entanto, suficiente para seduzir a indústria automóvel e, logo a seguir, expandir para o Japão [Fig.18].

Segundo Han Hoang (2005:31), tanto a *Unimation* como os seus concorrentes, tinham inicialmente como intenção que esses robôs substituíssem a mão de obra nas máquinas de fundição, moldagem, corte e pressão em tarefas de produção enfadonhas e repetitiva criando um robô mais universal, que manipulava equipamentos que já existiam. No entanto, em 1964, com a invenção de Ole Molaug, essa perspectiva mudou.



Figura 17
Robô *Unimate*

Ole Molaug era um engenheiro de uma empresa norueguesa de agricultura, que necessitou de uma solução para resolver um problema de pintura de carrinhos de mão, tendo inventado uma máquina automática muito simples para esse efeito. Ao contrário das intenções do *Unimate*, esta máquina foi criada com o objetivo de encontrar uma solução para um problema específico. Rapidamente a indústria automóvel tomou consciência do potencial da soldadura automatizada por pontos que se seguiu à pintura automatizada. Isto fez com que os responsáveis do *Unimate* lançassem robôs para tarefas mais específicas como a pintura e soldadura, vindo a contribuir para o aumento da produtividade nas linhas de montagem automóvel, assim como outras indústrias de manufatura (Hoang,2005:32).

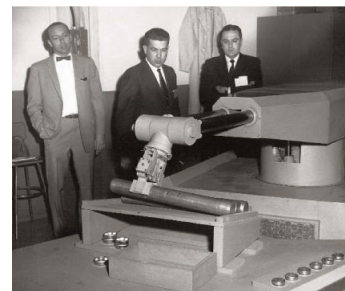


Figura 18

Presidente Joe Engelberger, eng. George Munson, eng. Maurice Dunne na GM, Trenton, NJ. Com o Unimate #001, 1961



Figura 19

Betty Myrah tem uma pausa para café servido por um robô *Unimate*, foto de Outubro 1967 por Frank Q. Brown, *Los Angeles Times*

A evolução do tipo de robô personificado pelo *Unimate* até à atualidade, introduziu vários benefícios em termos de segurança e higiene no trabalho, além de aliviar as pessoas de trabalhos repetitivos, geralmente classificados de desumanos. Contudo, apesar de aumentarem o nível de produtividade, estas formas de automação têm também vindo a substituir trabalhos em que esses problemas se levantam. Encontra-se ainda por determinar o real impacto ao nível do trabalho introduzido pela robótica, tal como sucedeu com outras inovações tecnológicas, a robotização da

indústria também gera a criação de novos trabalhos (ex: programação, manutenção, desenvolvimento de ferramentas para robôs). Contudo, não é claro que estes novos postos de trabalho sejam equivalentes àqueles que vão sendo substituídos. Apesar deste tema ser bastante importante para o mundo atual e futuro, o seu estudo ultrapassa o âmbito desta dissertação.

3.1.2. O Robô na Construção

Como descrito anteriormente, apesar da robótica já estar presente na indústria automóvel desde a primeira venda do *Unimate* em 1961, só a partir dos anos 80 é que começa a surgir na indústria da construção do Japão, embora com objetivos ligados à construção em obra. Esse primeiro período da robótica no Japão, foi interrompido após algumas conclusões desfavoráveis e mudança económica do país.

A reparação da robótica na construção ocorre por volta de 2005 na Suíça. Desta vez, porém, a robótica é introduzida por arquitetos num período em que o robô já estava solidamente presente noutras indústrias e em vários continentes. Nesta segunda fase, embora abordando sobretudo lógicas de prefabricação, o robô trouxe um valor acrescentado à arquitetura através de uma abordagem bem distinta da primeira fase de introdução no Japão.

Um maior esclarecimento sobre estes dois períodos é relevante para perceber o que realmente mudou nessa evolução, além dos constrangimentos que impediram a utilização dessa tecnologia na arquitetura.

1ª Fase - Japão

A tecnologia robótica foi introduzida na indústria Japonesa “*através dos Estados Unidos em 1968*” (Cousineau & Miura, 1998:11), principalmente na indústria automóvel e produção de equipamento eletrónico. Nestas áreas, esta tecnologia desempenhou um importante papel na automação das fábricas, que se traduziu no sucesso de marcas como a “*Toyota, Nissan, Honda, Sony, Panasonic, NEC, Hitachi e Toshiba*” (ibidem). O grande investimento na robótica levou o Japão a tornar-se o primeiro país a criar

uma associação de robótica em 1971, a *JIRA (Japanese Industrial Robot Association)*, e em 1975 formou-se o *RIA (Robot Institute of America)* seguido do *BRA (British Robot Association)* no Reino Unido (Hoang, 2005: 33).

Dada a natureza da construção, uma atividade tradicional, de grande escala e complexidade, a arquitetura não adotou essa tecnologia ao mesmo tempo que outras indústrias. No entanto, segundo Cousineau e Miura, no ano de 1978 e debaixo da direção do MITI (*Ministério da Indústria do Comércio*), a JIRA formou uma comissão para investigar a possibilidade de usar robôs na construção. Esta equipa era liderada pelo professor Yukio Hasegawa, que foi um pioneiro da engenharia robótica na Universidade de Waseda. Nessa comissão participaram jovens investigadores das principais empresas de construção, resultando no reconhecimento do potencial da tecnologia robótica, e a apresentação de novas ideias que foram transpostas para os laboratórios de pesquisa das devidas empresas (Cousineau & Miura, 1998:11).

O motivo desse forte investimento na década de 80 ocorreu pelo período auspicioso que o Japão atravessava. Vivia-se uma fase de grande crescimento económico e forte investimento na construção. Ao mesmo tempo, o país vivia uma crise de mão-de-obra no sector da construção provocada pela falta de atrativos que este trabalho oferecia. Esta situação foi agravada pelo rápido envelhecimento da população e diminuição do número de jovens com aptidão para trabalhar na construção (Cousineau & Miura, 1998: 11).

Esta situação de crise de mão-de-obra, captou o interesse das grandes empresas de construção segundo Cousineau & Miura (1998:8), acrescentando que essas empresas eram conhecidas como o “*Big Five*” (*Schimizu, Taisei, Kajima, Obayashi e Takenaka*) e procuravam soluções para essa carência. Cada uma destas empresas registava receitas anuais brutas de mais de quinze biliões de dólares e investiam cerca de 1% na pesquisa. Além do investimento, essas grandes empresas dispunham de instalações para o desenvolvimento e testes das novas tecnologias desenvolvidas que poderiam rapidamente ser testadas em obra. Tais



condições permitiram o desenvolvimento de mais de uma centena de robôs para tarefas simples [Fig.20;21 e 22]. Esses robôs vieram substituir parte da mão-de-obra nos trabalhos onde se registava grande carência, também conhecido pelos três “3k” ou “*Kitsui*” (difícil), “*Kitanai*” (Sujo) e “*Kiken*” (perigoso), segundo Cousineau & Miura (1998: 11).

Figura 20

(esquerda) Robô para inspeção de fachadas- Kajima Corporation, Tokyo, 1988

Figura 21

(direita) Robô para alisar o betão desenvolvida pela Shimizu Corporation, Kawasaki, Japan, em 1987

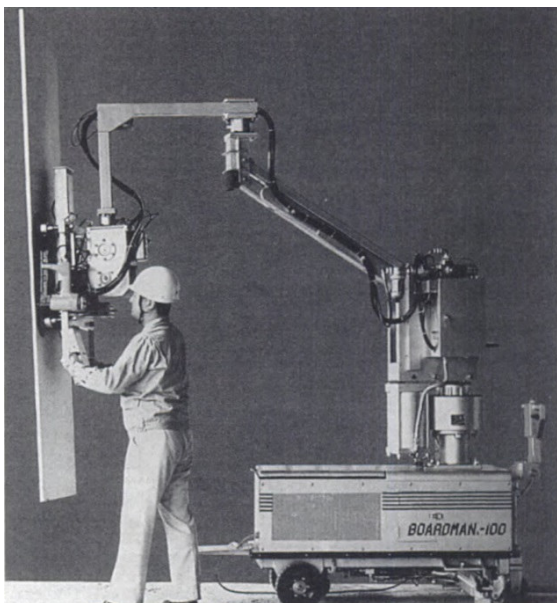


Figura 22

(esquerda) Robô de montagem de placas “Boardman-100”

O que convém notar neste período de investimento em investigação robótica no Japão é que o principal objetivo orientava-se para alcançar um aumento de produtividade e de qualidade na construção. Ao mesmo tempo, segundo Gann, nos “*Estados Unidos a pesquisa levada a cabo em universidades e laboratórios de pesquisa do governo destinava-se mais a gerar novos conhecimentos e desenvolver novas diretrizes. No Japão, a empresa contratante e os institutos R&D tinham como finalidade verificar e melhorar os projetos de engenharia e os procedimentos de construção*

através da experimentação e garantir a segurança nas estruturas Japonesas construídas”²⁴ (Gann, 1996 apud Cousineau & Miura, 1998:8).

Dos mais de cem robôs desenvolvidos nos institutos R&D, só pouco mais de uma dezena foram amplamente utilizados [Fig.22]. Segundo Cousineau & Miura (1998:91), o insucesso desse investimento na robótica, deriva de vários fatores como a “complexidade e variedade dos próprios edifícios, e o ambiente em que são construídos”. Além disso, o “transporte do equipamento e a cuidada manutenção dos robôs”. Na execução das tarefas, existiam ainda impedimentos, como a “impossibilidade de detetar irregularidades e efetuar as correções em tempo real, devido à falta de capacidade de reconhecimento e avaliação”. Estes obstáculos, são comparados com os que enfrentamos ainda hoje, mas a falta de flexibilidade (grande maioria só executa uma função) foi um dos principais motivos que levaram a maioria das companhias a desinvestir na investigação da robótica.

No seguimento deste insucesso, conclui-se que *“a utilização de robôs para tarefas simples não se produz uma melhora na economia global da construção, apesar destes serem capazes de aliviar os trabalhadores do trabalho sujo, difícil e perigoso, eles requerem demasiado tempo de preparação e limpeza. Reconhecendo isso os pesquisadores voltaram a atenção para a automação dos processos de construção*”²⁵ (Cousineau & Miura 1998:92) [Fig.23].

A maioria das dificuldades e desafios que se encontraram na automação da construção nesse período, ainda hoje persistem, demonstrando a dificuldade de utilização da robótica em contexto de obra.

²⁴“*In the United States, the objective of research conducted under government sponsorship at research universities and government laboratories is primarily to obtain new knowledge and to develop new principals. In Japan, the objective of the contractor R&D institutes is primarily to verify and improve engineering designs and construction procedures through experiment and to assure the safety of Japanese constructed facilities.*”

²⁵“*One of the most surprising lessons learned from single-task robots is that they do not improve the overall economy of construction. While single-task robots are able to relieve workers from dirty, difficult, and dangerous work, they take considerable preparation and clean-up time. Recognizing this fact, re-searchers began turning their attention to automating the building process.*”



Figura 23
Conceito da automação dos processos de construção no Japão, (1985)

2ª Fase - Suíça

O segundo período da integração da tecnologia robótica no campo da arquitetura tem características bem distintas do primeiro período no Japão, quer do ponto de vista dos seus objetivos, quer da abordagem tecnológica. Martin Bechthold (2010:119) defende que em comparação com os robôs de construção desenvolvidos no Japão, *“a fabricação robótica atual envolve menos resolução de problemas e mais exploração de desenho.”*²⁶, uma vez que parte com uma tecnologia já existente e amplamente utilizada na indústria, o robô industrial antropomórfico. Por outras palavras, pode-se dizer que a atenção a esta tecnologia é marcada por uma preocupação mais criativa do que técnica ou funcionalista.

Os grandes agentes deste período foram os arquitetos Gramazio & Kohler, investigadores no Instituto Federal de Tecnologia de Zurique (ETH). Adquiriram o primeiro robô industrial em 2005, tornaram-se no primeiro laboratório robótico para a investigação em arquitetura e processos de fabricação digital [Fig.24]. Os responsáveis afirmam que suas motivações, *“nunca foram racionalizar ou automatizar os processos de construção existentes, mas investigar as implicações de desenho dos processos de construção robótica”* (Gramazio, Kohler, & Willmann, 2014:10)



Figura 24
Primeiro laboratório robótico
na ETH Zurich, (2005)

²⁶“Compared with earlier construction robots, current robotic fabrication involves less problem solving and more design exploration”.

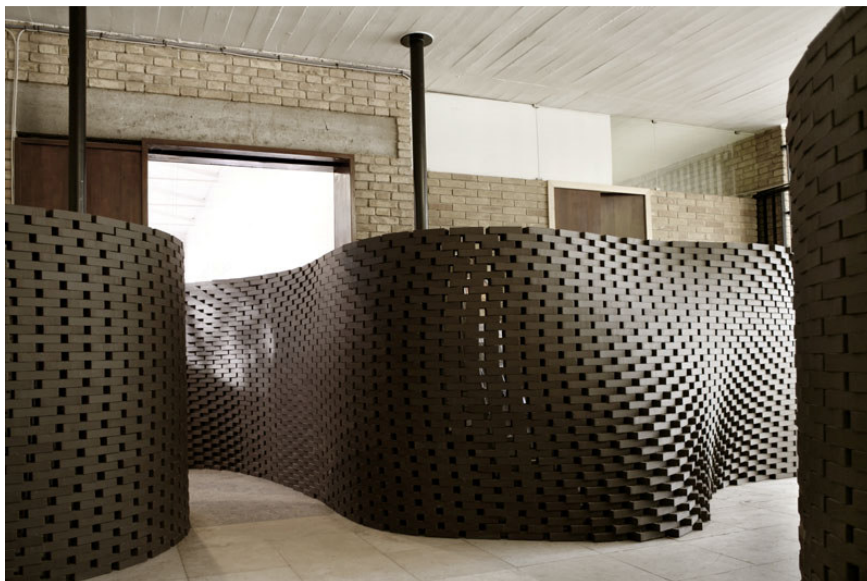


Figura 25
Instalação do pavilhão Suíço
na 11ª Bienal de Arquitetura
de Veneza (2008)

Entre os projetos iniciais, encontra-se o projeto da *Gantenbein Vineyard*, de 2006. Trata-se de um edifício construído através da montagem *in situ* de paredes em tijolo pré-fabricadas com o robô industrial em um imóvel, e que produzem um efeito material único. Pelo seu carácter pioneiro e aplicação em obra, este projeto será alvo de um estudo mais aprofundado no capítulo seguinte. A técnica de posicionamento diferenciado de materiais para a construção de partes de edifício non-standard, foi explorada em vários projetos posteriores, como na instalação “*Structural Oscillations*”, que foi encomendada para a representação da Suíça na 11ª Bienal de Arquitetura de Veneza em 2008 [Fig.25].

Verificando a versatilidade do robô para lidar com vários materiais, submetendo-os a várias estratégias formais e construtivas, Gramazio e Kohler criaram o conceito de “materialidade digital” (2008:7), que define como uma transformação emergente na expressão da arquitetura, uma vez que a materialidade tem vindo a ser enriquecida com características definidas pelo digital.

Pode-se afirmar que o robô industrial é a ferramenta de CAM mais universal como afirmam Gramazio & Kohler, “*o robô industrial tornou-se padrão na automação precisamente porque não é otimizado para apenas*

*uma tarefa, mas adequados para uma larga variedade de aplicações, tal como o computador pessoal*²⁷ (Gramazio & Kohler, 2008: 10).

Atualmente, encontramos essa tecnologia presente em várias áreas da arquitetura e na indústria que serve a construção, como se verificará no capítulo seguinte, sendo pouco provável que esta segunda aparição da robótica na arquitetura fracasse, como ocorreu no Japão.

3.2. O Braço Robótico

Sendo o braço robótico industrial antropomórficos²⁸ a tecnologia digital de eleição para este trabalho, pretende-se com este capítulo um maior aprofundamento sobre este, expondo as suas características, ferramentas e seu funcionamento mais orientado para a produção na arquitetura.

3.2.1. Caracterização

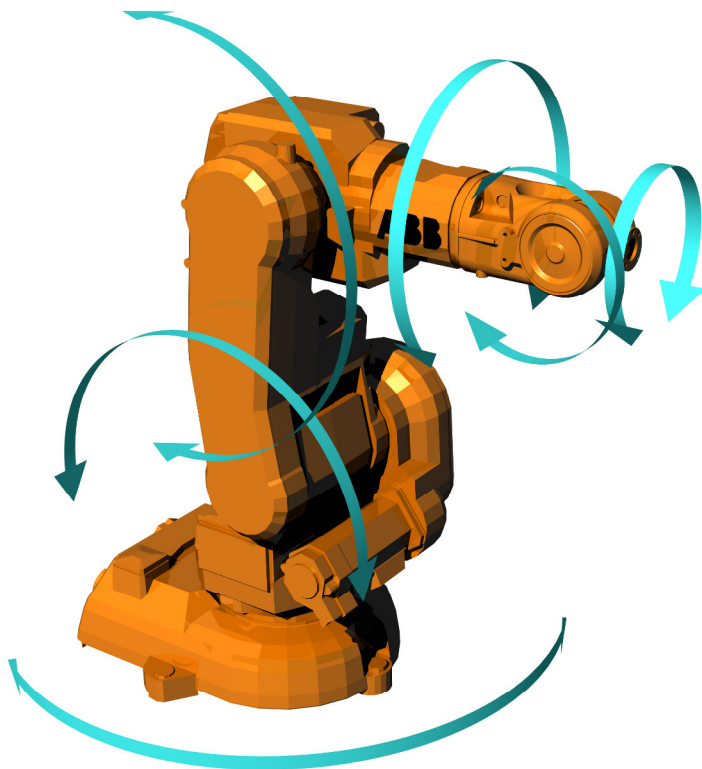
A melhor definição do robô industrial antropomórfico que podemos encontrar é a comparação com o braço humano, pois até na estrutura de controlo de informação podemos encontrar uma certa lógica semelhante à humana. Contudo, está longe da perfeição humana pela falta de sensibilidade e reação a fatores externos imprevisíveis, da inexistente ou limitada inteligência artificial, e da falta de locomoção própria.

²⁷ *“The industrial robot has become standard in automation precisely because, like the personal computer, it has not been optimized for one single task but is suitable for a wide spectrum of applications.”*

²⁸Um robô industrial é oficialmente definido pela Organização Internacional para Padronização ISO 8373 como um *"manipulador multipropósito controlado automaticamente, sendo programável em três ou mais eixos."*

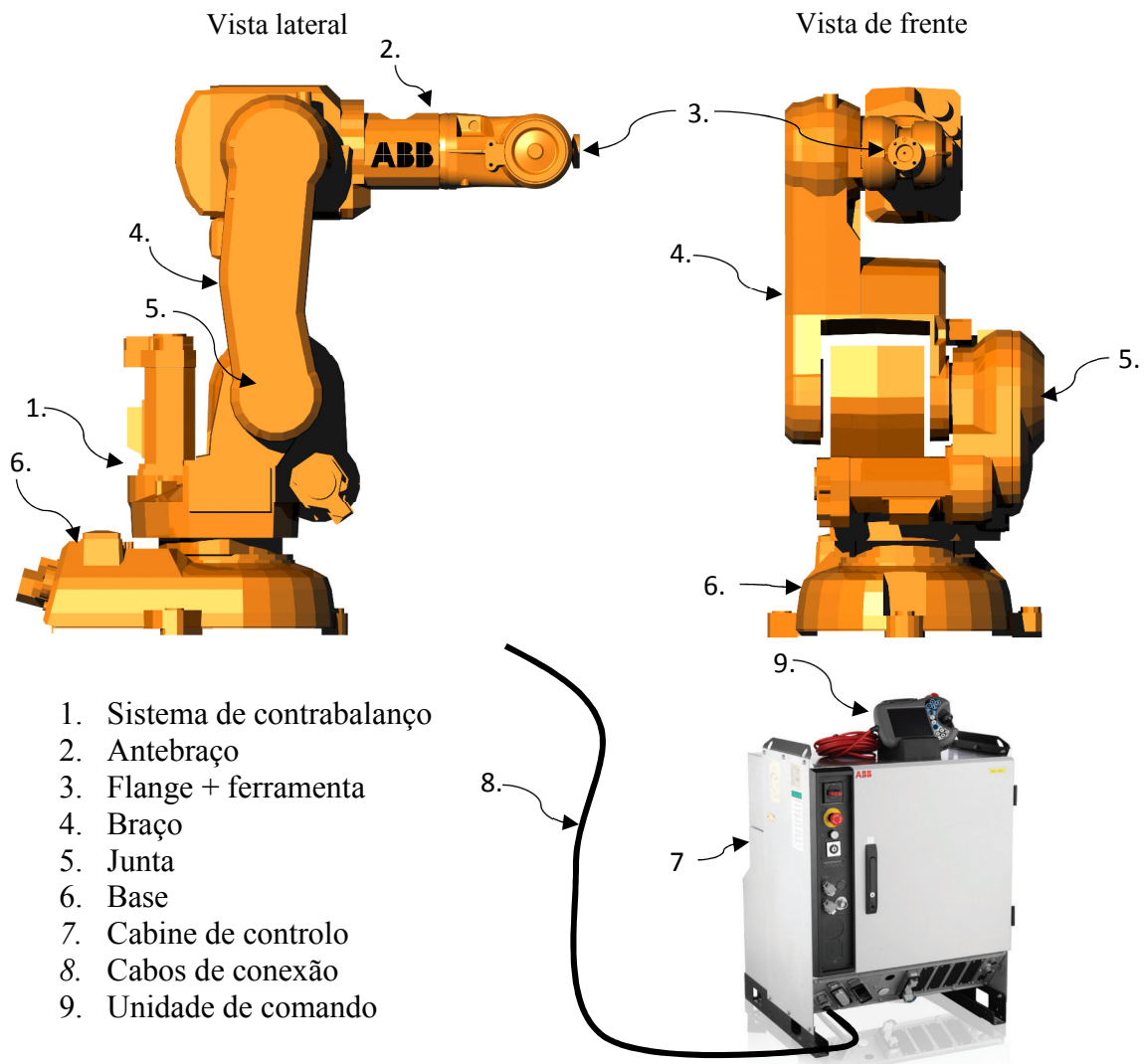
Tecnologia

O robô industrial deve ser dotado de três ou mais eixos [Fig.26]. Quanto mais eixos, maior liberdade de movimentos terá.



Atualmente existem vários modelos de braços robóticos, diferindo em características do ponto de vista do fabricante e do modelo. Variam sobretudo em relação ao tamanho; raio de ação; capacidade de carga; precisão; velocidade e o *software* que o controla. Este último, é o interface com que o usuário interage e tem progredido muito, tornando-se cada vez mais intuitivo. Este fator é determinante para a utilização deste equipamento por arquitetos e outros intervenientes que não sejam especializados nesta tecnologia, e sem os quais limitariam muito o seu uso.

Figura 26
Ilustração de robô antropomórfico ABB IRB 140 mostrando os 6 eixos de movimento



Ao braço robótico antropomórfico, são acopladas ferramentas à flange, que é a extremidade do braço e constitui o fim da cadeia cinemática dos vários membros constituintes do robô [Fig.27]. As ferramentas que se fixam na flange atuam sobre o material para o transformar ou manipular através de processos aditivos, subtrativos ou formativos.

Figura 27
Esquema de robô ABB IRB 140. Aplicável à generalidade dos robôs industriais.

3.2.2. Ferramentas

Sem ferramenta acoplada, o braço robótico seria uma máquina de movimento no espaço sem qualquer função. Neste campo, podemos encontrar uma grande variedade de ferramentas ou, em alternativa, criar uma personalizada, com o objetivo de solucionar tarefas de fabricação muito específicas, para um dado projeto ou objetivo [Fig.28].

As ferramentas que se fixam ao robô são chamadas de *End-Effector* (Monkman, et al. 2007:5). Podem ser passivos, nos casos de ferramentas básicas, como espeto ou caneta, ou ativos, no caso de serem mecânicos, como uma garra. O seu desempenho prático pode ser complementado pela inclusão e interação com sensores.

A vantagem do robô industrial está precisamente na possibilidade de utilizar um vasto leque de ferramentas, desde uma ferramenta convencional, à mais complexa ou perigosa, como um soldador ou uma serra elétrica. Além disso, temos assistido à criação de novas ferramentas desenhadas especificamente para a tarefa que vão executar, sendo difícil criar uma lista encerrada sobre estas ferramentas, devido à grande variedade.



Figura 28
Ferramenta criada para deposição do filamento, ELYTRA Filament pavilion, Victoria & Albert Museum, London, (2016)

As características e capacidades da ferramenta a utilizar têm de ser traduzidas para linguagem numérica e coordenadas de movimento com o robô, com vista a antecipar as ações da ferramenta sobre o material ou ambiente. Entre outras características deve ser considerada a sua dimensão, força ou precisão, dependendo da natureza da ferramenta e da operação de fabricação. Muita desta informação adquire-se com a experiência, e a experimentação, pois o material de trabalho possui também as suas próprias limitações e imperfeições.

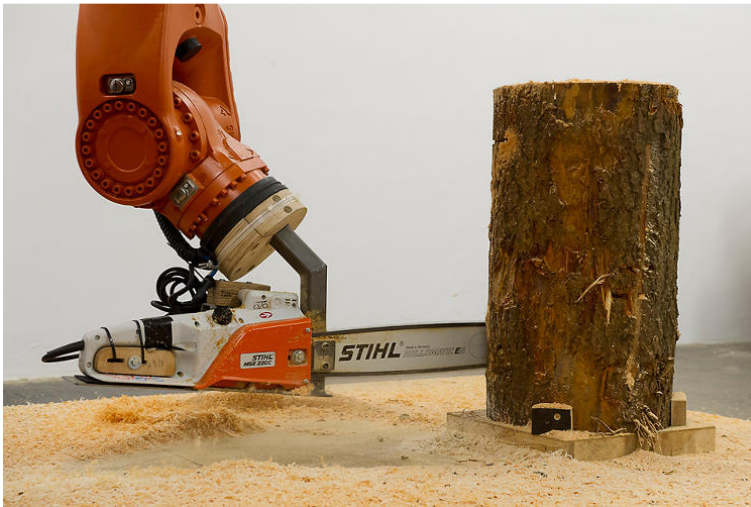


Figura 29
7xStool, Braço robótico a extrair um banco de um tronco com uma motosserra (2013)

Para a escolha da ferramenta a utilizar é, sobretudo, importante a compreensão das características do material com que se vai trabalhar e o acabamento pretendido. Resolver eficazmente estes parâmetros constitui um grande desafio à materialização robótica do projeto. Alguns poderão ser facilmente ultrapassáveis, enquanto outros apresentam alguma dificuldade no manuseamento [Fig.32]. Há ainda um longo caminho a percorrer para a compreensão da natureza dos materiais. A investigação tem, assim, um vasto campo de exploração que o robô industrial ajudou a estimular.

*“Na natureza, na maioria dos casos, o material aparece primeiro”*²⁹ (Oxman, 2010: 81).

²⁹*“In nature, in most cases, material comes first.”*

3.2.3. Funcionamento

Pode-se dizer que na grande maioria dos casos, o funcionamento desta tecnologia não se inicia no equipamento, mas no processamento de dados em computador. No caso da arquitetura, a partir do desenho digital CAD, que no fim é traduzido em informação numérica, contido num ficheiro de coordenadas e orientações que o robô reconhece. Desta forma, esta tecnologia trouxe-nos a possibilidade de poder explorar lógicas de produção personalizadas. A este respeito, Gramazio e Kohler referem que *“A Materialidade Digital evolui através de um jogo entre digital e processo material no design e construção. A síntese de dois mundos aparentemente distintos - o digital e material - gera novas realidades auto-evidentes. Dados e materiais, programação e construção são interligados. Esta síntese é conseguida pelas técnicas de fabricação digital, que permitem ao arquiteto o controle dos processos de produção através de dados do desenho”*³⁰ (Gramazio & Kohler, 2008: 7).

Esta tecnologia ainda não responde a estímulos, apesar de algumas já incorporarem sensores, mas responde às instruções que lhe são dadas para que reaja a certas situações. As suas ações são totalmente controladas pelo Homem através do processamento algorítmico.

Alan Winfield refere, contudo, que podemos considerar que o robô possui alguma inteligência artificial, que poderá ser desenvolvida para que ele reaja como se fosse mais inteligente, através dos seguintes passos (Winfield, 2012: 14).

- *Programando previamente um vasto número de comportamentos (instintivos).*
- *Projetando o robô para que possa aprender e posteriormente desenvolver a sua própria inteligência.*

³⁰*“Digital materiality evolves through the interplay between digital and material processes in design and construction. The synthesis of two seemingly distinct worlds - the digital and the material - generates new, self-evident realities. Data and material, programming and construction are interwoven. This synthesis is enabled by the techniques of digital fabrication, which allows the architect to control the manufacturing process through design data”.*

Das grandes vantagens do braço robótico industrial destacam-se a universalidade e grande força combinada com a precisão. No entanto, segundo Alan Winfield *“Os robôs das linhas de montagem são programados essencialmente para executarem uma sequência de movimentos repetitivos... Por conseguinte, estes robôs não são inteligentes”*³¹ (Winfield, 2012:21)

Sensores

Na fabricação existem vários fatores que limitam as atividades e tarefas do robô, dependendo da escala e do equipamento que se usa. Um dos fatores limitativos, por motivos de segurança, são as normas a que está sujeita a utilização dos braços Robóticos, uma vez que ainda não incorporam sensores para reconhecer e evitar o perigo de colisão com o Homem ou qualquer obstáculo que enfrentam.

Tal como o ser humano, também o robô precisa de sensores de percepção espacial, temporal, táctil ou de posição no caso dos robôs mais comuns, mas pode ser expandida a percepção visual, sonora e outras. Estes sensores podem ser internos ou externos. Desta forma, podemos agrupá-los para uma maior clareza:

- Orientação:
 - Relativa
 - Absoluta
- Localização
- Interação:
 - Envolvente
 - Material

O robô industrial, normalmente, é provido de sensores internos, como: potenciômetros; codificadores; acelerômetros; giroscópios; inclinômetros; bússolas ou outros, dependendo do modelo.

³¹*“Robot arms on an assembly line are typically programmed to go through a fixed sequence of moves over and over again, for instance... These robots are therefore not intelligent.”*

Quando o robô interage com a envolvente, há uma sequencia entre o ato e o sensor, como ilustra Alan Winfield [Fig.30].

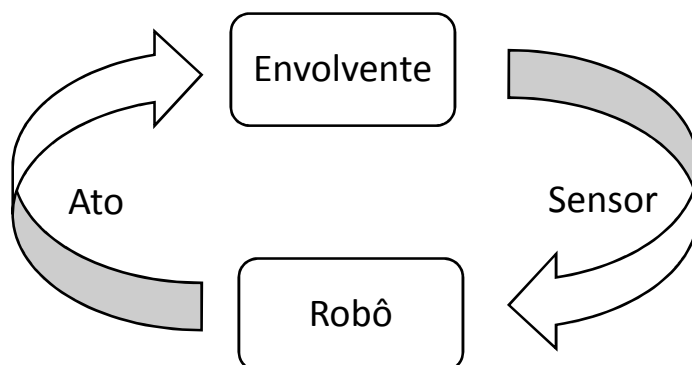


Figura 30
Esquema de interação do robô.

A falta de sensores eficazes que contribuam para alertar o robô industrial, da presença humana ou de situações imprevistas, é a grande justificação de normas restritivas no contacto com este tipo de tecnologia. A generalidade dos braços robóticos industriais, é desenvolvida, especificamente, para operar em espaços estruturados para o efeito. Em fábrica o robô tem uma posição específica, fixa ou com movimento limitado e controlado, onde se pode facilmente antecipar todas as possíveis situações que o robô poderá encontrar. No entanto, quando o espaço de operação não é estruturado, torna-se mais difícil identificar e prever certas situações, especialmente quando está em contacto com os humanos segundo Winfield (2012: 15). Este é o principal motivo para terem de operar em circuito fechado, regra definida através da classe de proteção, por normativas legislativas. Esse fator impede operações onde o Homem intervém ao mesmo tempo, pelo perigo que representa. No entanto, a recente alteração da norma de trabalho colaborativo ISO 10218-1:2011a permitiu que o Homem possa interagir com o robô, sem jaula de segurança ou outras barreiras, desde que este seja devidamente certificado.

A evolução de sensores que contribuam para impedir colisões, em situações imprevistas, poderá ser o fator determinante para uma maior flexibilização destas normas.

Apesar de os robôs industriais já existirem há algumas décadas, só agora despertaram interesse dos arquitetos, tendo como motivos principais os avanços do CAD enriquecido com a parametrização. Os avanços do *software* de programação torna-os mais flexíveis e intuitivos, permitindo a

profissionais, que não pertençam à área da engenharia, interajam mais facilmente com estes. E, por fim, a redução do custo e a crescente acessibilidade a essa tecnologia.

Mobilidade

A utilização de braços robóticos na construção *in loco* é ainda muito escassa, apesar de atualmente encontramos algumas formas que permitem expandir o limitado alcance do braço robótico. A forma mais comum de alargar o alcance do robô é através de carris que ampliam o alcance linear, mantendo a grande precisão e rapidez na fabricação. Contudo, esta tecnologia ainda se encontra dependente de esquemas de produção de pré-fabrico.

Têm-se também dado alguns passos no que respeita à mobilidade. Um bom exemplo disso, surgiu da ECHORD (*European Clearing House for Open Robotics Development*), que tem suportado projetos em vários países da comunidade Europeia. Entre eles o projeto *dim Rob (in-Situ Robotic fabrication)*, um projeto desenvolvido na ETH que explorava a integração da robótica na construção *in situ*. (Gramazio, Kohler, & Willmann, 2014:262)

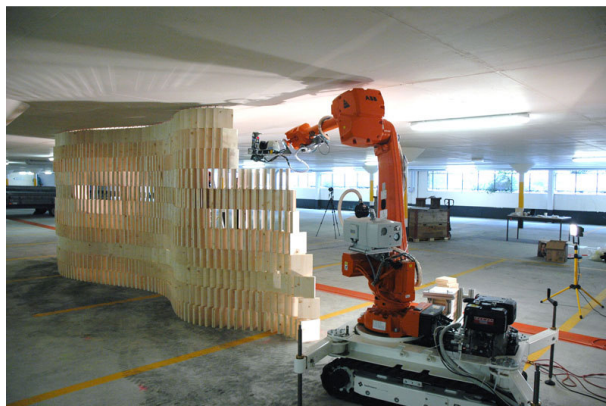


Figura31
Investigação *dimRob In Situ Robotic Fabrication*, Echord, ETH Zurich, 2011-2012

Terminado o projeto, os autores concluíram que “*era necessária uma significativa interação humana: O robô tinha de ser conduzido,*

*estabilizado e localizado manualmente por um operador, antes de ser capaz de construir algo*³² (CORAY.net).

Ao projeto *dimRob* [Fig.32] sucedeu o *In situ Fabricator*[Fig.31], um robô autônomo movido a diesel e equipado com um telêmetro a laser que permite o reconhecimento da envolvente e ajuda à sua localização espacial. Timothy Sandy conclui que “*o sistema deveria ficar dependente exclusivamente da detecção de bordo e da informática. Esta é uma distinção crucial em comparação com o seu precursor e um desafio de desenvolvimento significativo*”³³ (CORAY.net).



As dificuldades para se trabalhar *in situ* com o robô não se alteraram muito em relação à experiência no Japão. Como podemos comprovar com as sugestões dos autores do projeto *In situ Fabricator*(CORAY.net). Segundo estes, para trabalhar e num local de construção, um robô deve ser:

- *Móvel*
- *Robusto*
- *Preciso*
- *Consciente da sua posição no local da obra*
- *Capaz de se adaptar às incertezas*

Figura 32

In situFabricator, National Centre of Competence in Research (NCCR), 2014, a segunda imagem ilustra a leitura espacial do telêmetro a laser.

³²“*The functioning of “dimRob” however still required significant human interaction: The robot had to be driven, stabilized, and localized manually by an operator before being able to build.*”

³³ “*...the system should rely solely on on-board sensing and computing”, this is the crucial distinction compared to its precursor and significant developmental challenge.*”

Contudo, especialmente a mobilidade é ainda um dos grandes desafios da robótica na sua aplicação na construção *in situ*, pelas mesmas conclusões que levaram os investigadores japoneses a abandonar o projeto (Cousineau & Miura, 1998:91). Sendo elas:

- *Dependência energética, dado que o robô industrial necessita de uma alimentação constante e carga energética elevada;*
- *Transporte para o local de construção, uma vez que se trata de um equipamento muito pesado e que requer cuidados no manuseamento.*
- *Irregularidade espacial em obra, pois os ambientes são geralmente todos diferentes, a superfície inacabada é geralmente irregular, e por vezes com desníveis.*
- *Risco humano, porque são máquinas que ainda não reagem à imprevisibilidade humana.*
- *Ambiente de obra, com riscos de poeiras, humidade, vibrações.*
- *Cuidados de manutenção.*

Em boa verdade, o ambiente na construção não é muito diferente do ambiente nos anos 80 no Japão. Os desafios são muito similares, embora já se tenham dados largos passos investigação desta tecnologia.

Comunicação

Os processos CAD/CAM facilitam em muito a comunicação de intenções entre os vários elementos envolvidos na conceção, chegando por vezes até a dispensar impressões de desenhos de comunicação, dado que tudo pode ser resolvido digitalmente. Além disso, a informação pode fluir rapidamente, independentemente da localização onde se encontram as equipas envolvidas. Contudo, a robótica também exige um maior envolvimento dos profissionais, desde o conceito inicial, à montagem *in loco*. Isso obriga a uma maior implicação das equipas no objetivo final. Atualmente, essa implicação encontra-se muito facilitada pela internet que permite a comunicação verbal e visual e a transferência de dados em simultâneo. Esse fator diminui as distâncias num mundo cada vez mais digital.

“Os processos de descrição e construção de design podem ser agora mais diretos e mais complexos porque a informação pode ser extraída, trocada, e utilizada com muito maior facilidade e velocidade; em suma, com o uso de tecnologias digitais, a informações de design é a informação de construção”³⁴ (Kolaveric, 2003:10).

3.3. Aplicações

A aplicação robótica é muito extensa e de difícil identificação, porque um robô pode executar tantas tarefas quanto as várias ferramentas lhe atribuímos, sendo esse o fator que valoriza o braço robótico, a sua versatilidade. Por esse motivo, atualmente, podemos encontrar o robot industrial em diferentes setores como a indústria automóvel, indústria hoteleira ou carpintarias.

“O que está em curso é um desenvolvimento abrangente em toda a prática da arquitetura: a unificação do design e produção que - em conjunto com processos digitais - abre oportunidades totalmente novas para a materialização arquitetônica. O robô, assim, revisa a noção de arquitetura de processos mecânicos e põe em causa as divisões, anteriormente evidentes, entre projeto e construção, informação e mecânica e tecnologia e cultura de edificação”³⁵ (Gramazio, Kohler & Wilmann, 2014:103)

Apesar de a intervenção robótica já estar presente na arquitetura a partir do pré-fabrico e produção de elementos e materiais para a construção,

³⁴ *“The processes of describing and constructing a design can be now more direct and more complex because the information can be extracted, exchanged, and utilized with far greater facility and speed; in short, with the use of digital technologies, the design information is the construction information.”*

³⁵ *“What is under way is a comprehensive development in the entire practice of architecture: the unification of design and production that – in conjunction with digital processes – opens up entirely new opportunities for architectural materialisation. The robot thereby revises the architectural notion of machinic processes and calls into question the previously clear separations between design and construction, information and mechanics, and technology and building culture.”*

desconhece-se, no entanto, onde e quando se deu o início. Aquele que é considerado como o ponto de viragem na reintrodução desta tecnologia na arquitetura surgiu em Zurique, com a investigação levada a cabo por Gramazio & Kohler como referido no capítulo anterior:

*“Os robôs industriais são distinguidos pela sua versatilidade. Tal como os computadores, eles são adequados para uma ampla variedade de tarefas, porque eles são “genéricos” e, portanto, não adaptados para qualquer aplicação em particular.”*³⁶(Gramazio, Kohler & Wilmann, 2014:16)

3.3.1. Indústria

*“A primeira revolução industrial introduziu máquinas dedicadas a funções específicas, com o objetivo de aumentar a eficiência e reduzir o conhecimento e as capacidades manuais exigidas ao operário. O desenvolvimento extremo destas máquinas gerou a linha de montagem, onde o trabalho é repartido em pequenas etapas que não requerem qualquer tipo de aptidões especializadas por parte da força laboral e onde cada pessoa repete uma mesma tarefa específica”*³⁷ (Caneparo, 2014:4).

Um dos mais importantes fatores que levou a indústria a eleger o braço robótico foi a capacidade que tem em adquirir experiência instantânea, dispensando a formação ou estágio. Uma vez configurado o primeiro, os seguintes só necessitam que lhes seja transmitida a mesma informação, para executar rigorosamente as mesmas tarefas que o anterior. Outros

³⁶“Industrial robots are distinguished by their versatility. Like computers, they are suitable for a wide variety of tasks because they are ‘generic’ and therefore not tailored to any particular application.”

³⁷ “The first industrial revolution introduced machines dedicated to specific functions, with the aim of increasing efficiency and reducing the know-how and manual skills required from the worker. The extreme development of this is the assembly line, in which the work is broken down into small stages which do not require specialised skills from the workforce, of whom each person repeats the same specific task.”

motivos de eleição desta ferramenta pela indústria prendem-se com a precisão, a rapidez e por serem incansáveis na execução de tarefas.

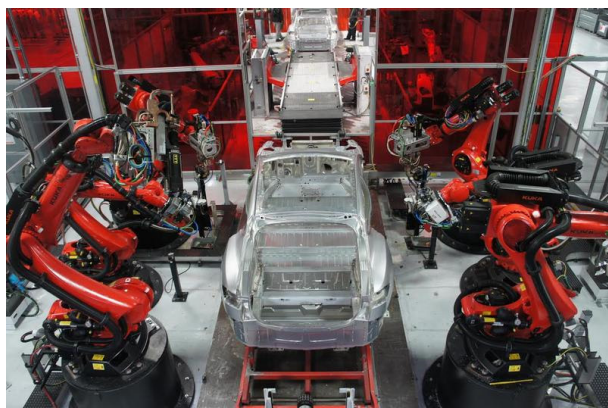


Figura 33
Linha de montagem com robôs KUKA numa fábrica de automóveis da Tesla Fremont, Califórnia USA

A utilização da robótica na indústria tem aumentado bastante [Fig.33]. Segundo a *IFR Statistical Department*, estima-se que existam 1 467 900 robôs no mundo (25 fevereiro 2016), prevendo-se que em 2018 entrem em serviço nas fábricas por todo o mundo 1,3 milhões de robôs industriais (International Federation of Robotics, 2014)³⁸. Destes, apenas uma pequena percentagem opera na construção e demolição.

Os robôs que operam nas linhas de montagem são considerados os “cavalos de trabalho da robótica” como descreve Winfield. Também apelidados de *manipuladores multi-eixo* de uma forma mais técnica (Winfield, 2012: 20). Os mais comuns são constituídos por uma base fixa no chão e uma série de segmentos, cada um conectado ao próximo por uma junta e um motor. No final desta cadeia de segmentos encontra-se a junta da flange ou o efetuador, que possibilita a utilização da ferramenta desejada.

Na indústria também podemos encontrar as duas abordagens de fabrico, a repetitiva do mesmo produto (*Standard*) ou personalizada *Non-standard*. Contudo, podemos afirmar que a grande maioria dos robôs que operam no mundo são programados para executar exaustivamente a mesma tarefa e o mesmo produto sem variação de um para o outro, usando apenas a capacidade física e operativa desta ferramenta.

³⁸Relatório disponível em <http://www.ifr.org/news/ifr-press-release/survey-13-million-industrial-robots-to-enter-service-by-2018-799/> consultado no dia 18 de abril 2016.

Atualmente, com maior consciência das capacidades que a robótica nos oferece, podemos apontar para uma gradual mudança de atitude na utilização desta tecnologia, como sugerem Gramazio & Kohler (2008:8). “*Daqui em diante, não estaremos a desenhar a forma que será produzida, mas o próprio processo de produção*”³⁹.

A arquitetura tem elevado as capacidades do braço robótico industrial a um campo bastante diferente da indústria, chegando, por vezes, a impulsionar a investigação tecnológica. A produção *non-standard* não representa apenas a finalização do produto ou objeto mas constitui o resultado de um processo criativo mais envolvente.

O cliente pode estar envolvido no processo de design, à semelhança com o conceito *mTable* em que o próprio cliente personaliza o seu produto [Fig.34]. O *designer* informa a produção e recolhe dados do processo e material para ajustar ou melhorar o design antes da produção final. A entrega é feita ao cliente final que pode ser o mesmo que interferiu no processo de desenho.



Figura 34

Algumas variações possíveis da *mTable* renderizadas “Customizable table series” Gramazio Kohler Architects, Zurich (2002)

Atualmente também encontramos a presença robótica em indústrias que fornecem produtos para a construção. É cada vez mais frequente, encontrar

³⁹“From now on, we no longer design the form that will ultimately be produced, but the production process itself.”

robôs na indústria que também servem a arquitetura, como carpintarias, pedreiras, serralharias, alvenaria entre outras.

3.3.2. Arquitetura

A utilização da robótica na arquitetura, surgiu da investigação de processos de fabrico digital iniciada na Suíça em 2005, desde esse período, várias universidades iniciaram investigação na arquitetura, incluindo a Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto com a inauguração da *Digital Fabrication Laboratory* (DFL) em 2015.

O rápido crescimento da investigação robótica na arquitetura deu origem à *International Association for Robots in Architecture* ROB|ARCH que tem como principal objetivo oferecer *workshops* e organizar conferências internacionais em escolas e universidades sobre o tema. O *website* da ROB|ARCH dispõe de um mapa com a localização de centros de investigação e empresas registradas na associação, que utilizam robôs industriais antropomórficos, dando-nos uma perspetiva global da presença da robótica na arquitetura [Fig.35].

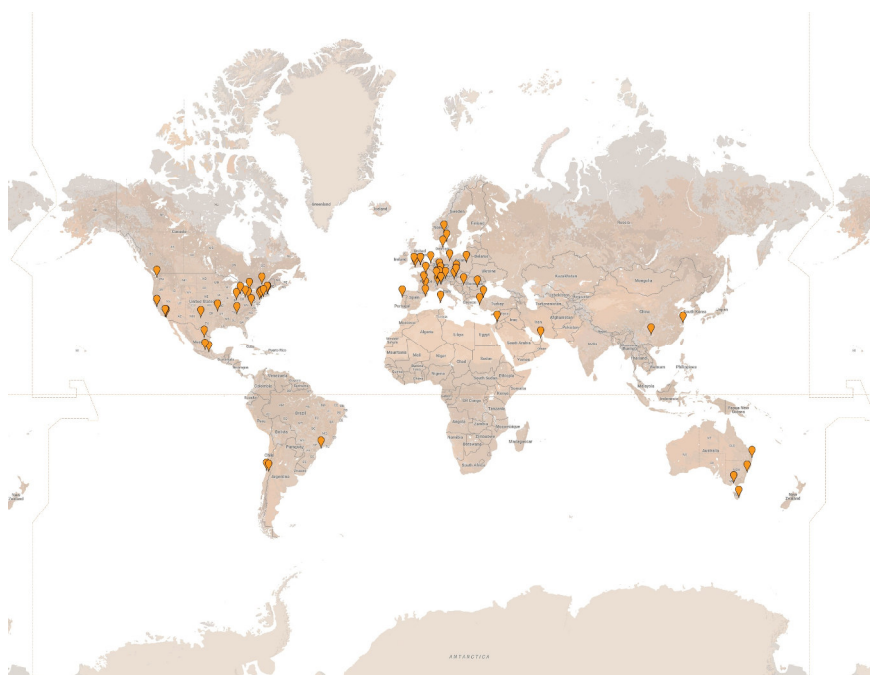


Figura35
International Map of Robots in
the Creative Industry
[22/09/2016]

Atualmente encontramos a intervenção robótica na construção de edifícios como a Basílica da Sagrada Família em Barcelona [Fig.36], além de outras intervenções, algumas apresentadas neste trabalho.

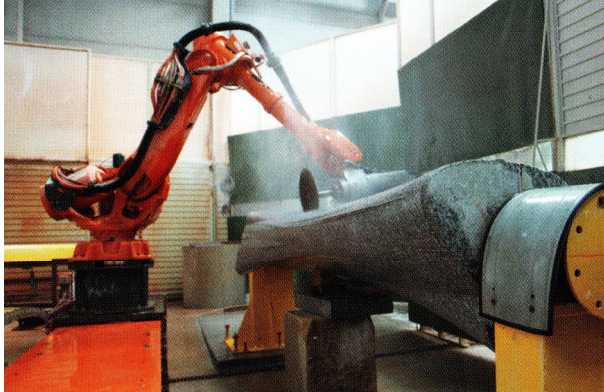


Figura 36

A primeira das colunas do grupo do nártex da fachada da sagrada família de Barcelona, a ser esculpida por uma serra a disco controlada numericamente

Segundo Gramazio & Kohler (2008:8) é possível “*incorporar no desenho, no momento de concepção, a ideia e o conhecimento da produção. Por sua vez, o entendimento da construção como parte integrante do desenho de arquitetura ganha um maior significado. O artesanato digital continua, assim, a tradição de construção na arquitetura.*”⁴⁰

Atualmente, como verificamos através do mapa [Fig.35] existem algumas empresas ligadas à robótica que foram criadas por arquitetos, como a Odico Formwork Robotics, RoboFold, Machineous, ROB Technologies e GREYSHED, Branch Technology entre outras que têm feito a ponte entre a pesquisa acadêmica e a indústria, disponibilizando novas ferramentas e software, ou oferecendo seus serviços e produtos. Este fator é também relevante para a arquitetura como verificaremos no caso de estudo *Robofold ‘ARUM’* (2012). Essa visão é também defendida por Jelle Feringa, “*partilhar a plataforma tecnológica da robótica com a indústria incentiva a transferência de conhecimento da academia para a indústria*”⁴¹ (Feringa,2014:62).

⁴⁰ “*The design incorporates the idea and knowledge of its production already at its moment of conception. In turn, the understanding of construction as an integral part of architectural design takes on greater significance. Digital craftsmanship thus continues the tradition of construction in architecture.*”

⁴¹ “*Sharing the technological platform of robotics with industry encourages the transfer of knowledge from academia to industry.*”

CASOS DE ESTUDO

4.

4. CASOS DE ESTUDO

Para um melhor entendimento das aplicações, o impacto e o potencial destas tecnologias, serão analisados, em seguida, alguns casos de estudo. Estes estão organizados segundo o tipo de processo em que se utiliza o robô industrial antropomórfico: aditivos, subtrativos e formativos. A integração dos exemplos nestas categorias faz-se através do reconhecimento da principal técnica de fabricação que é utilizada pois, naturalmente, estes trabalhos podem envolver outros processos e materiais. A escala foi também um critério importante, porque valida a utilização desta técnica em edifícios ou pavilhões. Quase todos os casos de estudo apresentados são compostos por elementos pré-fabricados, com o apoio da robótica e montados *in situ* manualmente, ou com o auxílio de máquinas. O pavilhão *ICD/ITKE Research Pavilion (2012)*, foi fabricado pelo robô no sítio, e o *Smart Dynamic Casting (2012)*, distingue-se dos anteriores, por ser muito focado na investigação da produção de colunas.

4.1. Processos aditivos

Embora seja um processo popularmente conhecido pela impressão 3D, a utilização de robôs industriais, veio abrir um leque de possibilidades que dificilmente seriam concretizadas por processos tradicionais de fabrico ou construção.

O processo conhecido pela impressão 3D, quando traduzido à grande escala, é conhecido por *Contour Crafting*⁴². À escala da robótica existem processos similares em diferente materiais como, por exemplo, a extrusão de plásticos para produção de estruturas e objetos.

Outro processo, conhecido por *Stacking*, consiste na montagem de materiais, como a alvenaria, peças de madeira ou outro material similar. É neste processo que se insere o próximo caso de estudo.

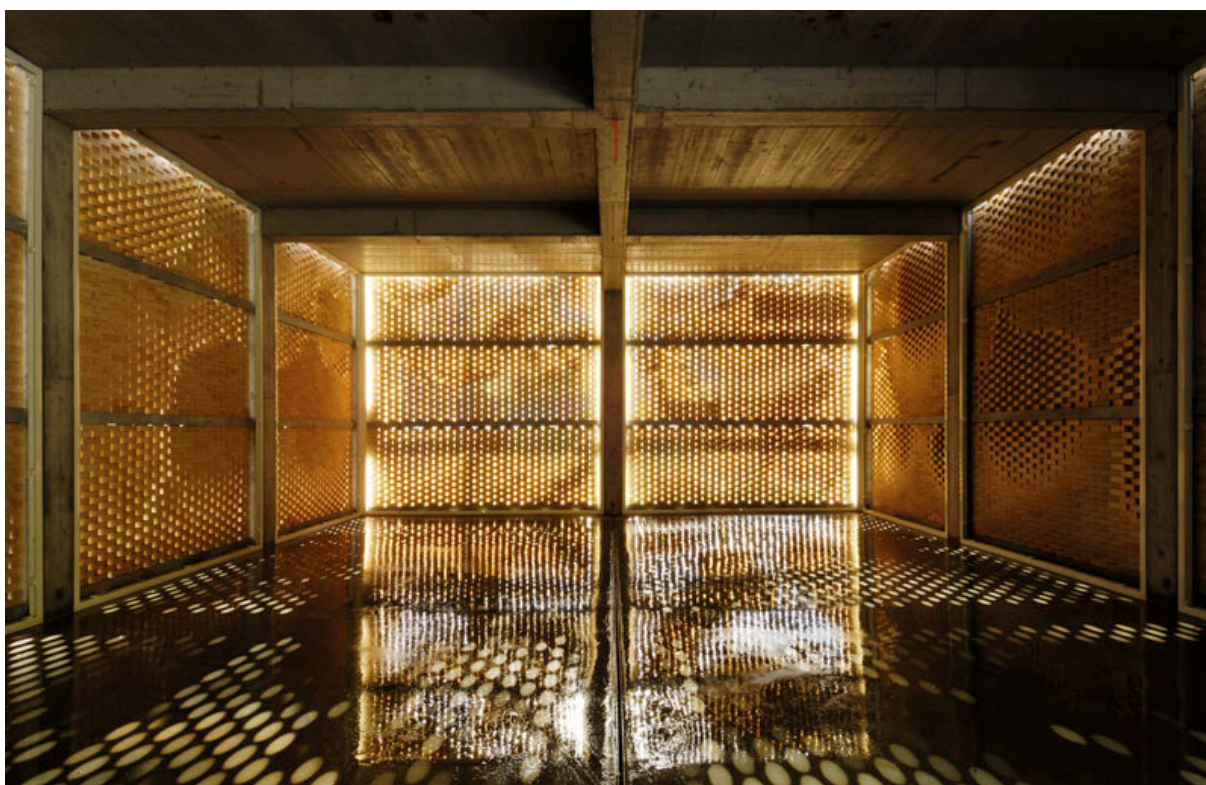
⁴²*Contour Crafting* é um conceito desenvolvido em 2001 por BehrokhKhoshnevis, na *ViterbiSchool* da Universidade do Sul na Califórnia, começando o estudo de montagem de materiais e componentes para a extrusão à grande escala. (Soar e Andren, 2012:128)

4.1.1. Gantenbein Vineyard (2006)

Este projeto apresenta vários aspetos de interesse, não só arquitetónicos, mas também históricos, por se tratar da primeira encomenda em que a capacidade robótica é indispensável na fabricação, e sem a qual seria muito difícil a sua execução. Como os autores afirmam, este é um projeto charneira por duas razões⁴³ (Gramazio, Kohler, & Willmann, 2014:16).

Em primeiro lugar, foi a primeira vez que um robô industrial teve uma aplicação na arquitetura. O robô intervém na montagem, efetuando uma tarefa de extrema dificuldade para o homem, porque cada tijolo tem um ângulo e uma posição específica, onde a precisão é indispensável, baseando-se numa lógica digital, de difícil compreensão para o homem durante o ato construtivo [Fig.37].

Em segundo lugar, por tornar possível, através da utilização de robôs, a transição do desenho digital para a materialização da construção.



⁴³ “This project is pivotal for two reasons: first, it marks a historic break as the first-time architectural application of an industrial robot [...] Second, the Gantenbein Vineyard Façade is significant since it points to the question of how digital design can address the architectural capacities made accessible by the robot.”

Figura 37
Vista interior no primeiro piso da Gantenbein Vineyard

Ficha técnica

Projeto:	Gantenbein Vineyard Facade, Fläsch, Suíça, 2006
Cliente:	Martha and Daniel Gantenbein (Fläsch, Suíça)
Arquitetos:	Bearth&Deplazes (Chur, Suíça) Gramazio & Kohler (Zurique, Suíça)
Engenheiro estrutural:	JürgBuchli
Teste estrutural:	Dr. NebosjaMojsilovic (ETH, Zurique, Suíça) Markus Baumann (ETH, Zurique, Suíça)
Robô	Kuka KR 150 L110 em carril linear

Conceção

Este edifício já se encontrava em construção quando foi proposto a Gramazio e Kohler para que desenvolvessem e executassem as fachadas. Gramazio e Kohler, (2008:95) contam que esta encomenda partiu da equipa de arquitetos *Bearth & Deplazes*, contratados pelo cliente, que pretendia expandir as instalações da sua bem-sucedida pequena quinta, onde se produzia vinho, acrescentando que o edifício consiste numa extensão onde iria funcionar uma área de fermentação no piso intermédio, uma cave onde se armazena os barris do vinho, e o último piso em terraço para provas de vinho.

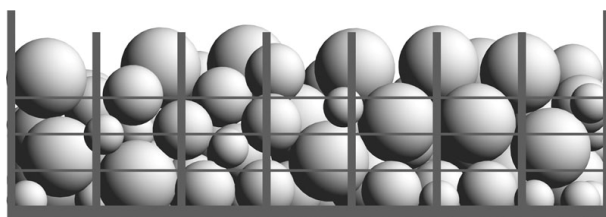
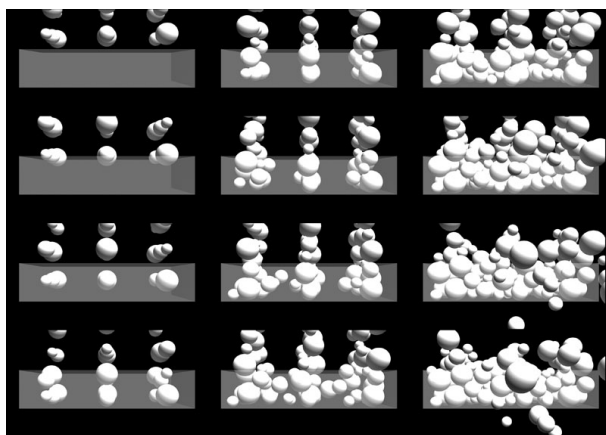


Figura 38

Produção do conceito para a composição da fachada

Figura 39

Conceito da fachada, onde o contraste de luz e sombra, determinam o ângulo de rotação dos tijolos

O conceito para a criação da textura na fachada, “*foi inspirado numa caixa com uvas de diferentes tamanhos, tendo a estrutura base como “caixa”*. *Os tijolos funcionam como um condicionador da temperatura, filtrando a luz que prejudicaria o processo de fermentação*” (Gramazio e Kohler, 2008:95).

Uma vez que a estrutura já existia, os esforços foram concentrados no preenchimento dos espaços entre as colunas e vigas, providenciando uma “pele” de encerramento do espaço interior.

Segundo os autores, o conceito para a definição que origina a rotação dos tijolos, partiu da imagem de uma caixa de uvas de vários tamanhos, modelada virtualmente à escala da estrutura já construída [Fig.38]. Depois procedeu-se à renderização⁴⁴ onde a luz dá profundidade aos volumes num ambiente de contrastes de preto e branco, e através de programação por *Scripting*, traduz a intensidade da sombra da imagem renderizada, em amplitude da rotação de cada tijolo num máximo de 17° [Fig.39].

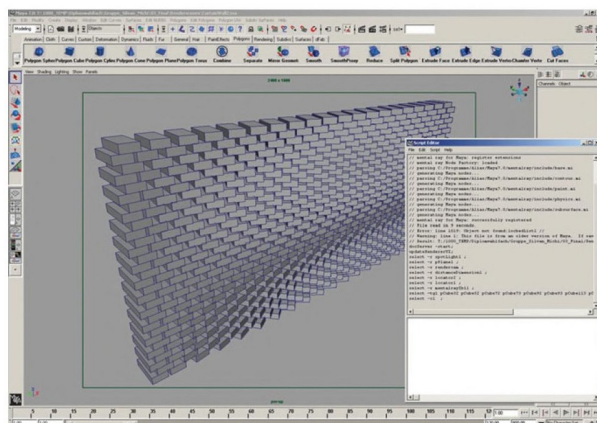


Figura 40
Desenvolvimento dos painéis com *software Maya e linguagem Scripting*. (ETH Zurich)

A preparação dos dados para “alimentar” o laboratório de informação para a fabricação “*foi desenvolvida em Maya*⁴⁵, [Fig.40] com o recurso a *linguagem Scripting*” (Naboni, Paoletti, 2015:45). Desta forma, permitia o desenvolvimento de uma parede virtual à escala, onde o tijolo assume uma

⁴⁴*Renderização* - Embora não conste no dicionário, este termo é largamente utilizado, por não haver outro que melhor descreva esse processo virtual. Por renderização entende-se o processo pelo qual se pode obter o produto final de um processamento digital, neste caso aplicado à modelagem tridimensional.

⁴⁵*Maya*, é um software de modelação virtual 3D, da *Autodesk*. Muito utilizado para produção de ficção no cinema e desenvolvimento de Jogos, permitindo a *linguagem Scripting*.

forma digital. Esta possibilidade permitiu manipular a grande quantidade de tijolos com o mínimo esforço, Além disso, o “*programa, reserva a superfície de contacto mútuo entre os tijolos para o adesivo*” (Gramazio, Kohler, & Willmann, 2014:69).

Segundo Gramazio e Kohler (2008:95), os limites de rotação de cada tijolo, não excedem os 17° em ambas as direções. A rotação também teve em consideração a orientação solar, que determinaria a quantidade de sombra, importante para a compreensão e leitura da fachada.

Materialização

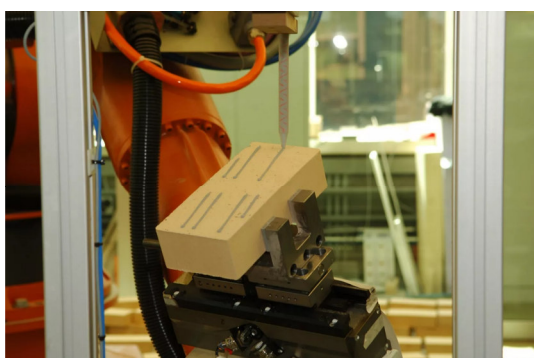
Para a compreensão do processo, torna-se indispensável um breve resumo da história inicial da utilização da robótica na ETH, já apresentada na página 36, sobre a unidade de fabricação robótica no laboratório da *ETH* de Zurique, criada em 2005, com a instalação do braço robótico. Este, segundo Gramazio, Kohler e Willmann (2014: 466), tinha um alcance de 3 metros, montado num prato rotativo que se movia em carris permitindo expandir o alcance em 7 metros lineares e rodar 360 graus. Além disso, o laboratório estava equipado, na altura, com uma estação para a mudança automática do efetuador, uma rampa de tijolo, dois tipos de *gripper* (efetuador) com dedos paralelos para tijolos de tamanho estandardizado.

Com apenas três meses para o desenvolvimento do *design* e montagem no local do preenchimento da fachada, tornou-se crucial o recurso à pré-fabricação. O preenchimento dos espaços entre as colunas da fachada fez-se com 72 painéis, elaborados no laboratório da ETH Zurique, segundo Gramazio & Kohler (2008:48). Acrescentando que os painéis eram compostos por 23 camadas de alvenaria, assentes numa fina viga pré-fabricada, e com um total de 20 000 tijolos posicionados com os parâmetros programados [Fig.41].



Figura 41
Fabricação dos painéis pré-fabricados como robô Kuka KR 150 L110 em carril linear

Como o robô não tem sensibilidade para as imperfeições geométricas do mundo real, o material teve de ser escolhido pela perfeição geométrica para que não ocorressem colisões. Contudo, o ligante poderia absorver algumas das imperfeições da alvenaria. Nesta superfície de apoio entre os blocos, foi projetada uma trama que coincidia com a área de aplicação da cola, variando de tijolo para tijolo. [Fig.42].



Na obra, os painéis eram colocados no devido local com o recurso a uma grua, sendo esta fase do processo rapidamente executada. [Fig.43].

É importante ressaltar que em todo este processo há uma forte intervenção humana, com vários níveis de conhecimento, desde o conhecimento do material que se está a utilizar, passando pela tecnologia e programação.

No interior, foram instalados painéis de policarbonato para proteção do vento. No último piso, os tijolos funcionam como balastrada para o terraço, segundo Gramazio e Kohler (2008:95). Este terraço foi, posteriormente, coberto com perfis metálicos e chapa ondulada.

Figura 42
(esquerda) Robô a colocar adesivo

Figura 43
(direita) Montagem dos painéis pré-fabricados *in situ*

Resultado

Se o observador olhar para o resultado final, sem conhecer o processo de execução, muito, provavelmente, ficará intrigado pela forma como foi executada esta fachada, que aparenta uma utilização de matéria-prima comum, como a generalidade das paredes construídas no mesmo material. Além de ser construído em curto espaço de tempo e quase sem desenhos. Por estas razões, a fabricação robótica foi essencial para viabilizar a intenção arquitetónica original.



Uma das características que torna este projeto interessante é o fato de recorrer à alta tecnologia e *software* avançado, enquanto utiliza um material de construção pré-fabricado, com uma longa história e tradição: o tijolo de alvenaria. Além disso, não existe quase nenhuma alteração física da matéria-prima utilizada, o tijolo é apenas posicionado de acordo com instruções numéricas e com resultados surpreendentes.

Figura 44
Fachada, Gantenbein Vineyard



Figura 45
Detalhe interior dos painéis
na Gantenbein Vineyard

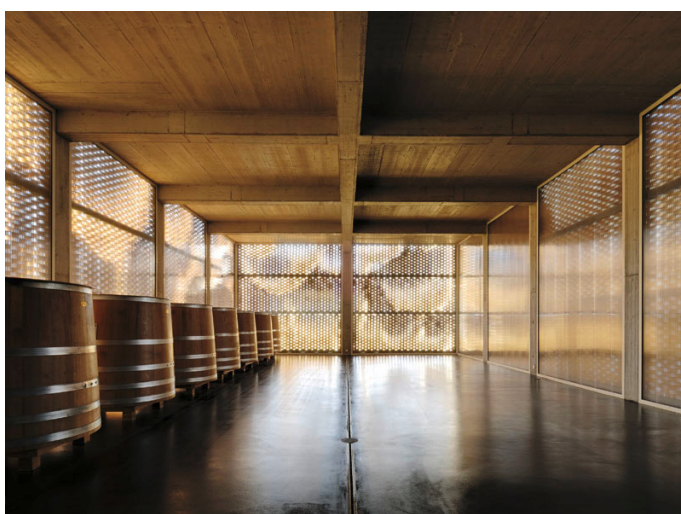


Figura 46
Interior do primeiro piso
concluído com os painéis
de acrílico

A forma como decorreu o processo deste projeto é, um bom exemplo, de como a investigação pode contribuir para soluções construtivas de elevado interesse para a aplicação na arquitetura. Neste caso, a aproximação ao centro de investigação por intermédio dos arquitetos contratados pelo cliente.

Além das capacidades criativas e produtivas que a equipa disponibiliza, também desenvolveram uma ferramenta em formato de *plug-in*⁴⁶, o *Brick Design*. Essa ferramenta foi disponibilizada *online*, e oferece a possibilidade de desenho e modelação através da parametrização de paredes semelhantes às do projeto apresentado.

Esta intervenção, embora limitada à estrutura existente, enriqueceu e caracterizou o edifício na paisagem, assim como o espaço interior.

⁴⁶ Componente de *software*, extensão que nos oferece capacidades além do software original.

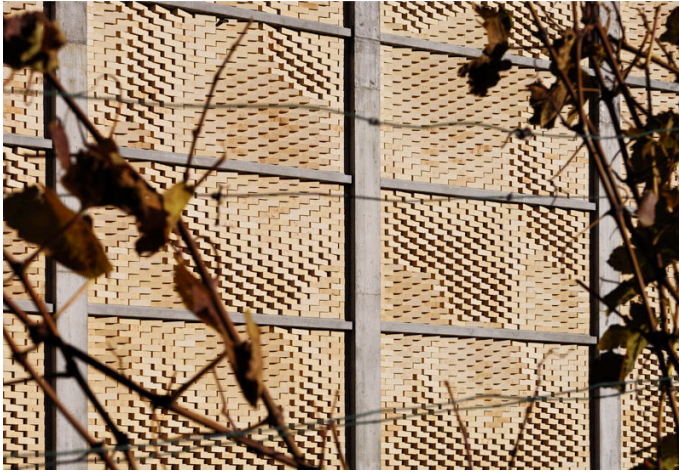


Figura 47
Gantenbein Vineyard
(pormenor da fachada com
os tijolos)



Figura 48
Gantenbein Vineyard

Este projeto é o único edifício permanente dos casos de estudo em análise neste trabalho, validando a utilização desta tecnologia na prática da arquitetura. Concluído em 2006, inaugura um novo método de produção arquitetónica com recurso à robótica, ou como os autores descrevem de “*materialidade digital*”.

4.1.2. ICD/ITKE Research Pavilion (2012)

Desenvolvido entre o *Institute for Computational Design (ICD)* e o *Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE)* da Universidade de Estugarda, foi concluído em novembro de 2012, e segue uma sequência de projetos de investigação que os Institutos promovem anualmente e que apresentam o potencial de novos processos de design, simulação e fabricação robótica em arquitetura.

Este foi um projeto multidisciplinar, levado a cabo por pesquisadores de arquitetura e engenharia de ambos os Institutos, juntamente com os alunos da faculdade e em colaboração com biólogos da Universidade de Tübingen. Segundo Menges e Knippers (2015:45), o objetivo foi investigar a possível inter-relação entre as estratégias de design biomimético e os novos processos de produção robótica. Acrescentando que na base do pavilhão ICD/ITKE Research Pavilion 2012, está o desenvolvimento de um processo inovador de fabricação robótica no contexto da indústria da construção, com base no enrolamento de fibras de carbono e vidro, assim como as respetivas ferramentas de projeto computacional e métodos de simulação.

Figura49
ICD/ITKE Research
Pavilion 2012



Ficha técnica

Projeto:	ICD/ITKE Research Pavilion 2012
Instituição:	ICD Institute for Computational Design – Prof. Achim Menges ITKE Institute of Building Structures and Structural Design – Prof. Jan Knippers
Arquitetos e orientação:	Jakob Weigle Prof. Achim Menges Prof. Jan Knippers
Robô:	KUKA Roboter GmbH – Robô de 6 eixos juntamente com um sétimo eixo externo.

Conceção

O projeto surge das análises biológicas de diferentes “subtipos de invertebrados, com vista a investigar a anisotropia e morfologia funcional dos artrópodos” [Fig.50], e segundo os investigadores, “os princípios biológicos observados foram analisados e resumidos a fim de serem subsequentemente transferidos para princípios de conceção viável para aplicações em arquitetura” (Knippers et al., 2015:51).

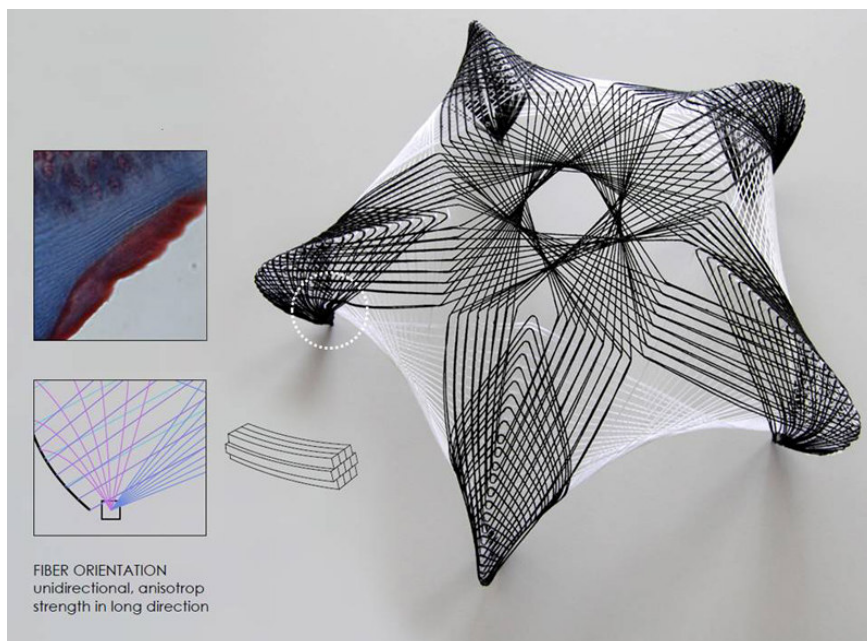


Figura 50
Análise biológica e estudo da orientação da fibra no ICD/ITKE Research Pavilion 2012

De acordo com Menges & Knippers (2015:42), os investigadores concluíram que existem apenas quatro tipos de fibras de polímero básicos em biologia: a celulose é o material fibroso comum em plantas, colágeno nos animais, quitina em insetos e crustáceos, e sedas nas teias de aranha. Desta paleta limitada de constituintes fundamentais, a natureza consegue

construir uma gama extremamente diversificada de sistemas variando o arranjo fibroso e densidade, bem como da composição química da matriz. A conceção e fabrico deste pavilhão tem início nesse pressuposto.

Nas conclusões desta análise, os investigadores indicaram também que as sucessivas camadas de fibras, mudam constantemente durante o processo de fabricação sequencial, devido à interação complexa da matriz não curada (Knippers et al., 2015:51). A partir dessa informação os investigadores estudaram várias formas de aplicação dos resultados obtidos à escala real [Fig.51].

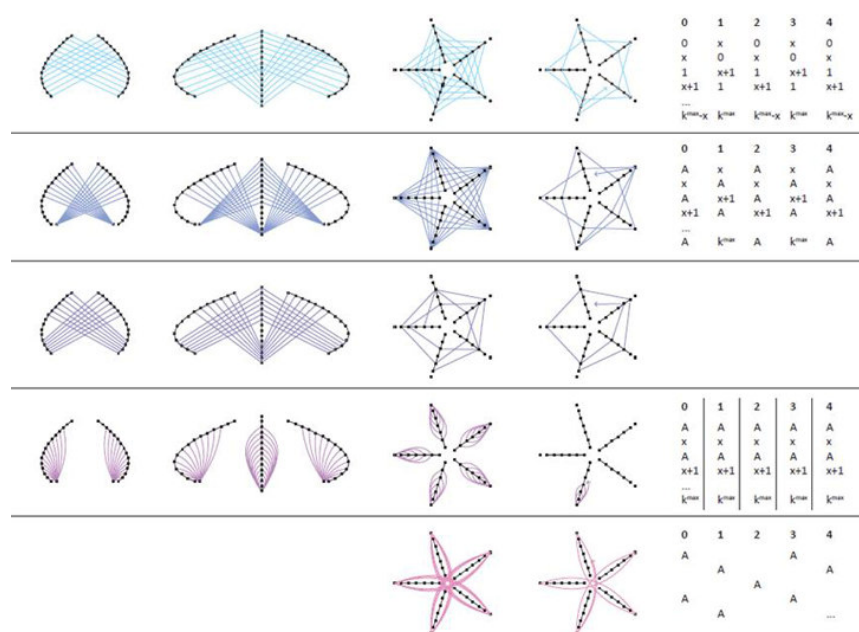


Figura 51
(esquerda) estudos sobre a orientação da fibra, e fluxo de força na cobertura do pavilhão (ICD/ITKE Research Pavilion 2012)

Para o cálculo da estrutura foram necessários vários testes ao material, uma vez que não era um material comum na construção [Fig.52]. Devido à sua leveza, também houve a necessidade de efetuar o estudo da ação do vento sobre a estrutura.

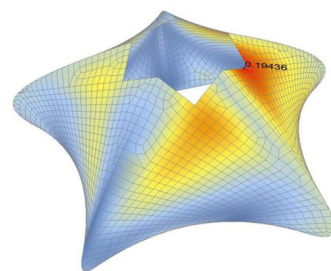


Figura 52
Simulação da estrutura do pavilhão (ICD/ITKE Research Pavilion 2012)

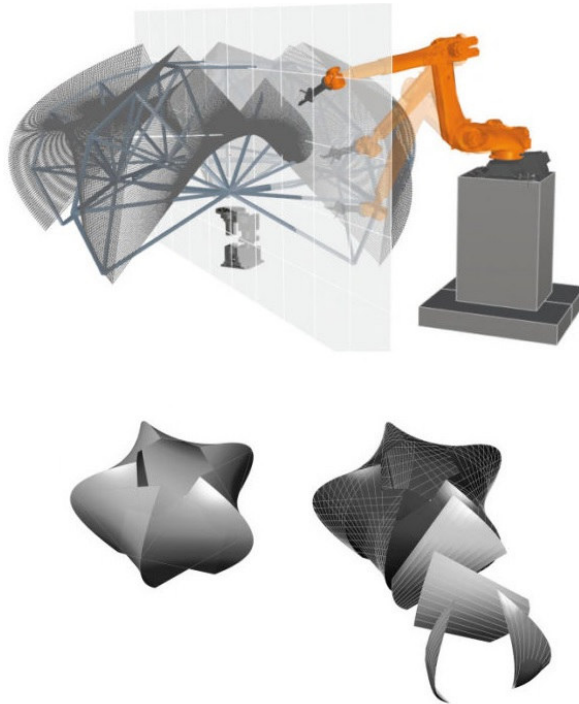


Figura 53
Simulação virtual
da tecelagem da
fibra com o robô

Materialização

A fabricação robótica do pavilhão foi realizada no local e, segundo os autores, foi executado com um robô de 6 eixos instalado num pedestal com dois metros de altura para maior alcance [Fig.53 e 54]. A este juntou-se um sétimo eixo externo com tecnologia CNC. Ao todo, o robô atingia uma extensão de trabalho global, e altura de quatro metros (Knippers et al., 2015:53).



Figura 54
Robô a efetuar a tecelagem
da fibra (ICD/ITKE Research
Pavilion 2012)

Como material de construção foram escolhidos polímeros reforçados com fibra de vidro e carbono, devido à alta resistência e leveza, além do potencial para gerar a aparência de materiais diferenciados por meio de variação na colocação da fibra. Estas características, apontaram os polímeros reforçados com fibras como os adequados para implementar as geometrias complexas e as composições materiais dos princípios de construção [Fig.55].

As fibras foram colocadas sobre uma estrutura temporária de aço leve, linear, com pontos de ancoragem definidos entre as quais foram esticadas. A partir dos segmentos de retas das fibras pré-esforçadas emergiram as superfícies com a forma curva dupla, que se tornaram característica do pavilhão.



Figura 55
Robô a tecer e pormenor dos filamentos da fibra de vidro cruzados

Além da estrutura temporária, as fibras foram aplicadas a um molde embutido. Segundo Archim Menges (2015:26), depois de aplicada a fibra, o suporte foi removido e o molde mantido, uma vez que foi reforçado pelas fibras, que obedeciam a uma disposição geométrica inspirada nas análises biológicas. Para chegarem a uma disposição da fibra que satisfizesse estruturalmente, foram efetuadas várias simulações e ajustes, tanto à fibra, como ao molde.

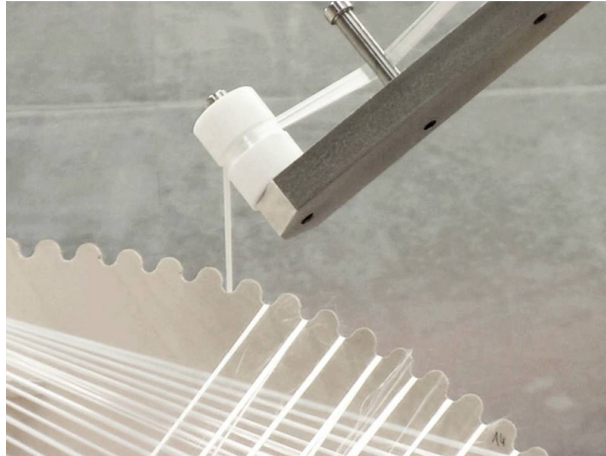


Figura 56
Detalhe da ferramenta do robô a tecer com fibra (ICD/ITKE Research Pavilion 2012)

Durante o processo de fabricação, as fibras foram saturadas com resina, imediatamente antes da colocação feita pelo robô [Fig.56]. Esta configuração específica, fez com que fosse possível obter uma estrutura de cerca de “8 metros de diâmetro e 3,5 m de altura por enrolamento contínuo de mais de 60 quilômetros de fibras” (Menges, 2015:26).

Depois de concluído o processo robótico de depósito dos filamentos embebidos na resina, e terminada a cura, a estrutura temporária foi desmontada e removida, permanecendo o depósito que determina parte da forma que é parcialmente ocultado pela fibra que o cobre.

Resultado

A arquitetura deste pavilhão emerge das características do material e dos resultados de uma investigação biológica, que ajudaram a determinar como a fibra seria depositada no molde. A forma geral, também resultou dos constrangimentos estruturais do material [Fig.57].

Apesar do seu tamanho e extensão considerável, a “cobertura semitransparente do pavilhão pesa menos do que 320 kg” (Knippers et al., 2015:53).

Este projeto de investigação apresenta uma abordagem inovadora, em vários aspetos como: a seleção do material, o processo de conceção e fabricação, a ferramenta de construção (efetuator). Na conceção, o projeto envolveu uma ampla equipa multidisciplinar, incluindo a biologia. A investigação ajudou os investigadores a determinar o posicionamento das

fibras, material elegido e desenvolvido especificamente para este projeto, tendo sido melhorado com resinas depois de vários testes. Para a deposição da fibra foi desenvolvida uma ferramenta específica para o robô.

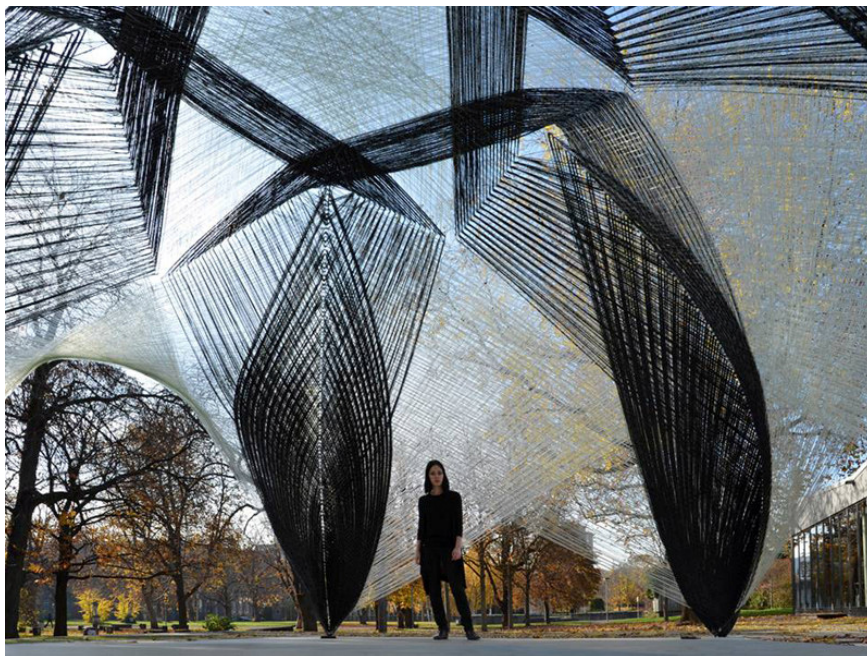


Figura 57
Vista interior do
ICD/ITKE Research
Pavilion 2012

O fabrico com a medição de força e resistência, entre o braço robótico e o material utilizado, apresentam uma área pouco explorada e que só se consegue com a prática. O estudo, sobre o material e o processo de fabrico, surgiu de vários estudos efetuados sobre o material. Os autores tiveram de repetir, várias vezes, os processos efetuando várias leituras do comportamento mecânico do material em relação à força aplicada. Os resultados dos testes foram traduzidos na velocidade com que o robô trabalhava.

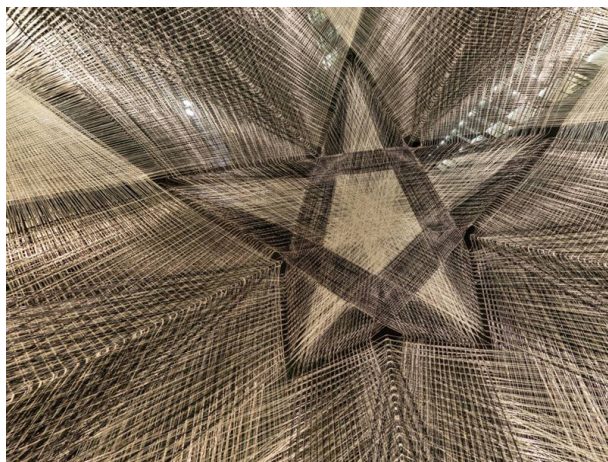


Figura 58
Detalhe no meio do
pavilhão, onde as fibras
que se cruzam ICD/ITKE
Research Pavilion 2012



Figura 59
Pormenor dos apoios
(ICD/ITKE Research
Pavilion 2012)

A aparente leveza formal é própria da estrutura, do produto acabado, expondo as qualidades estéticas naturais do material, sem recurso a trabalhos secundários ou acabamentos [Fig.59]. Este tipo de estrutura dilui a distinção entre arquitetura e engenharia.

Outro aspeto, de algum interesse, prende-se com as relações estabelecidas para a realização deste projeto. Deparamo-nos com um percurso muito invulgar quando comparado com a generalidade dos projetos. Estas questões abrem a perspetiva de uma profissão multi-facetada, com o envolvimento de elementos ou equipas de outros campos de atuação.

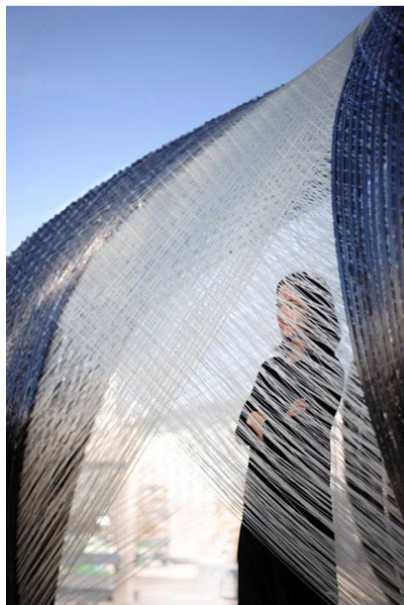


Figura 60
Pormenor da fibra
(ICD/ITKE Research
Pavilion 2012)

4.1.3. Análise

Estes dois projetos, de fabrico aditivo, são de natureza muito distinta. O primeiro, é executado com um material de tradição milenar na construção, sólido e pesado. O segundo é materializado com recurso a um material desenvolvido para o efeito caracterizando-se pela a leveza e transparência. Contudo, o que os une é o fabrico com recurso ao robô industrial, sem o qual seriam de difícil execução.

Enquanto no projeto *Gantenbein Vineyard*, (2006), o material é aplicado de uma forma aproximada aos processos tradicionais, apenas diferindo nos ângulos e tipo de adesivo, no pavilhão ICD/ITKE 2012 todo o processo é novidade, revelando a forma de como o braço robótico oferece novas possibilidades de fabrico. Além de introduzir na arquitetura, novas perspectivas de materialização com qualidades materiais, estéticas e estruturais, também incentiva uma reflexão mais profunda sobre as propriedades mecânicas dos materiais e a forma de projetar.

Em 2013-2104 estas duas instituições ICD e ITKE voltaram a colaborar para construir outro pavilhão de pesquisa [Fig.68], dando seguimento à técnica explorada no Pavilhão ICD/ITKE de 2012. Ambos reúnem os contributos de estudantes e pesquisadores de uma equipa multidisciplinar.



A construção dos dois pavilhões em filamento, o ICD/ITKE de 2012 e de 2013-2014 [Fig.61], levou à encomenda de uma estrutura para o *Victoria & Albert Museum* em Londres em 2016 intitulada de ELYTRA [Fig.62].

Figura 61
(esquerda) ICD/ITKE
Research Pavilion 2013-
2014

Figura 62
(direita) ELYTRA
filament pavilion,
Victoria
& Albert Museum,
London, 2016

4.2. Processos subtrativos

Este é dos processos mais populares, por vários motivos, nomeadamente, a maior facilidade na remoção de matéria e a maior disponibilidade de tecnologia CNC, quando comparado com os processos de adição ou formação de materiais.

Como o título indica, este processo consiste na subtração ou remoção material para atingir a forma desejada. É um processo com uma grande disponibilidade ferramentas para o talhe e a fratura; o seccionamento ou desgaste, gerados por ação mecânica, ação química, ação elétrica, ação térmica e ultrassónica, entre outras.

Apesar dos processos subtrativos serem amplamente utilizados na manipulação de materiais, estes são os menos sustentáveis pois resumem-se à remoção de matéria indesejada para obter o objeto pretendido o que, frequentemente, gera muito desperdício de material não reciclável. Porém, esta técnica é muito atraente, uma vez que permite realçar as qualidades naturais do material trabalhado.

Um dos aspetos mais limitadores desta técnica é a impossibilidade de se criar vazios no material. A ação parte geralmente de fora para dentro da peça. No entanto, a utilização da robótica veio a proporcionar uma intervenção mais alargada do que a tecnologia agarrada aos eixos XYZ, e que constituem os limites da generalidade das tecnologias subtrativas CNC.

Os dois casos de estudo seguintes foram materializados recorrendo ao mesmo tipo de material, o que nos permite avaliar duas abordagens de fabrico distintas.

4.2.1. Serpentine Pavilion (2005)

Um pavilhão, deriva do “*latim “papiliōne-, (borboleta), pelo francês pavillon”, e tipologicamente representa uma “construção de madeira desmontável e portátil”, ou um “recinto coberto, de grandes dimensões, que pode ser usado para a prática desportiva ou para os mais diversos fins.*”⁴⁷

Esta filosofia de pavilhão está subjacente a este projeto, construído para *Kensington Gardens* em Londres e onde, todos os anos no verão, desde o ano de 2000 até à data (excluindo o ano de 2004), se inaugura um novo pavilhão⁴⁸ que ali permanece, durante três meses. Segundo Jones (2005:31) esta iniciativa tem como intenção principal exibir arquitetura de primeira classe para o público.



Figura 63
Vista a partir da Serpentine
Gallery

⁴⁷“Pavilhão” no Dicionário da Língua Portuguesa com Acordo Ortográfico [em linha]. Porto: Porto Editora, 2003-2016. [consulta 2016-05-22 15:53:20]. Disponível na Internet: <http://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa/pavilhão>

⁴⁸ Anualmente, são convidados arquitetos de renome internacional, que nunca projetaram na Grã-Bretanha para projetar um pavilhão junto às instalações da *Serpentine Gallery*. (Jones, 2005:25) O primeiro pavilhão foi projetado por Zaha Hadid em 2000 e, desde então, já participaram neste projeto os arquitetos Daniel Libeskind, Toyolto, Oscar Niemeyer, Álvaro Siza e Eduardo Souto de Moura com Cecil Balmond, Kjetil Thorsen e Olafur Eliasson, Rem Koolhaas com Cecil Balmond, Frank Gehry e SANAA, Jean Nouvel, Peter Zumthor, Herzog & de Meuron e Ai Weiwei, Sou Fujimoto, Smiljan Radić, Selgas Cano em 2015, e Bjarke Ingels in 2016.

Ficha técnica

Projeto:	Serpentine Gallery Pavilion 2005, Londres, Inglaterra
Cliente:	Serpentine Galleries
Arquitetos principais:	Álvaro Siza Vieira (Porto) Eduardo Souto de Moura
Engenharia:	ARUP – Cecil Balmond (UK)
Manufatura da madeira:	Finnforrest Merk (Finlândia)
Processo robótico:	MERK Timber GmbH (Aichach, Alemanha)
Robô:	Robô com 5 eixos

Conceção

Este projeto inicia-se com uma série de condicionantes, que foram determinantes para as opções na arquitetura. Entre elas destacam-se:

- Oferecer espaço para apresentações de filmes, conferências e atividades de entretenimento à noite, além de uma área de estar para o café que abre durante o dia.
- Considerar as árvores existentes, evitando danificar as raízes ou copa.
- O local atribuído, com área máxima para a construção.
- A relação com o edifício Serpentine gallery.
- Construção dentro do limitado orçamento.
- Evitar a utilização de guias no parque real (TRADA.net).
- Possibilitar ser trasladado e remontado em outro lugar, após o período de exposição no parque.

A estrutura deveria estabelecer um diálogo entre as árvores, o edifício e a paisagem envolvente. Além disso, o tamanho das peças deveria permitir que fossem “*levantadas e montadas por um ou dois homens*” (Iwamoto, 2009:14).

Um outro aspeto, prende-se com o preenchimento da estrutura com painéis de policarbonato semi-translúcidos, tornando o espaço interior impermeável e interrompendo a *“1,30 metros do nível do solo, permitindo, assim, que o verde da paisagem natural possa fluir”* (Siza, Moura, Obrist, 2005:89). Esta solução proporciona a sensação de um espaço encerrado, quando estamos em pé, e o prolongamento do nosso campo de visão, além do pavilhão, quando estamos sentados, mas proporcionando sempre uma sensação de abrigo no meio do parque.

Para a iluminação foi desenvolvido um sistema autónomo de energia, produzida por meio de uma série de luzes de energia solar autónomas, cada uma posicionada no centro de cada painel.

O piso de tijolo cinzento, com formato retangular de ângulos retos, atua como contraponto para a curvatura da estrutura principal, definido num padrão linear.



Figura 64
Eduardo Souto Moura e
Álvaro Siza Vieira

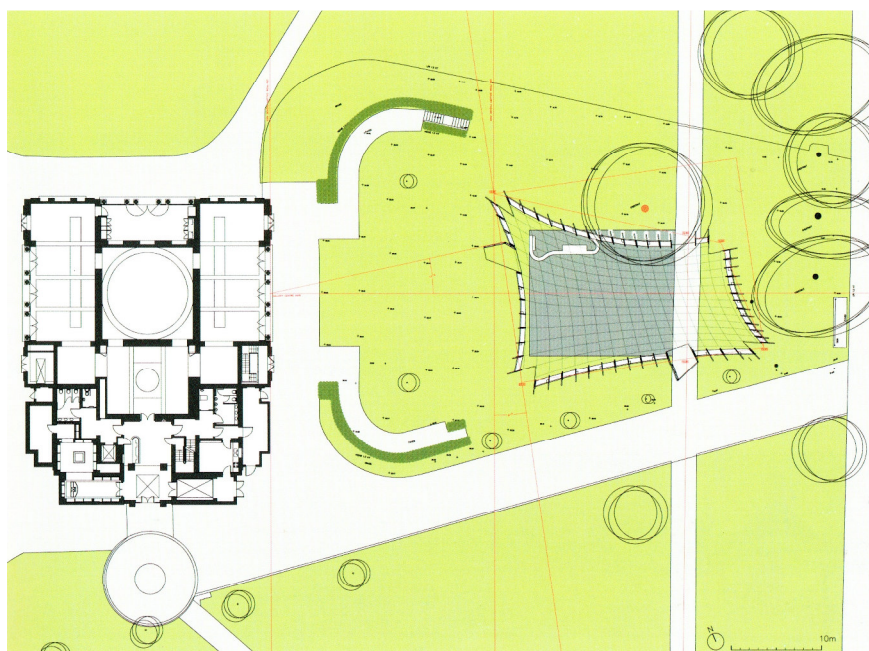


Figura 65
Planta de piso do pavilhão e
da galeria Serpentine
Pavilion (2005)

A escolha da madeira *“foi inspirada na arte Povera”* (Siza, Moura, Obrist, 2005:86). Os arquitetos procuravam um material vernacular, evitando o *“High-tech, neste sentido, em conjunto com os engenheiros, efetuaram um estudo de velhos edifícios de madeira, como quintas na Inglaterra, onde procuravam inspiração para as juntas de madeira. Procuraram também, na arquitetura Japonesa, detalhes de construção de madeira”* (idem:93). Desta pesquisa, surgiu a *“opção pela lamela de madeira associada a uma*

junta de encaixe e pino (mortice and tenon joint)” (Tsukui, 2006:28). A partir daí, os arquitetos começaram a desenvolver o projeto. A implantação no local em forma curvilínea, a interação com a envolvente, a escala e proporções foram desenvolvidas através do desenho de mão livre pelos arquitetos Siza Vieira e Souto Moura [Fig.66].

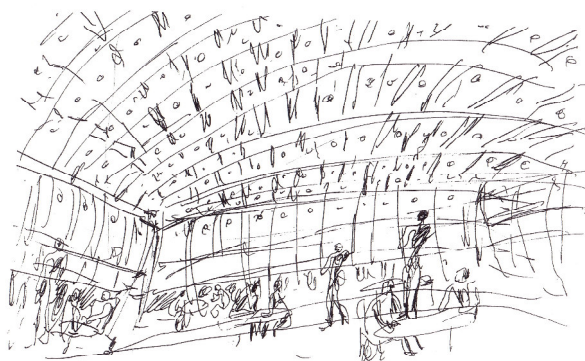


Figura 66
Evolução do desenho,
Eduardo Souto de Moura
2005

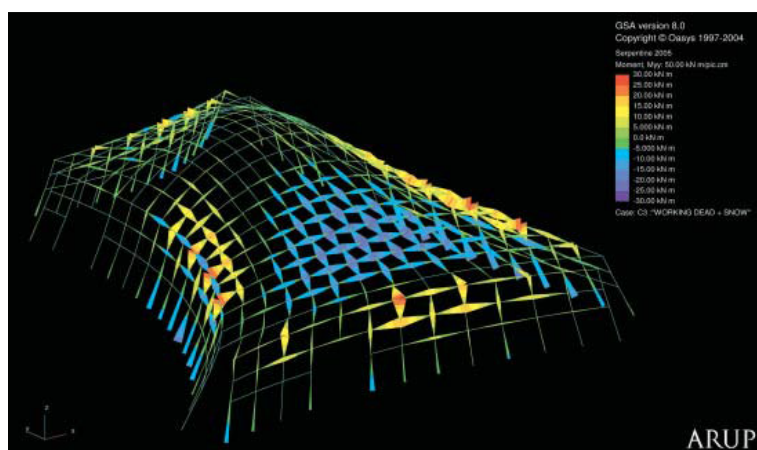


Figura 67
Teste estrutural, Arup 2005

A geometria avançada desenvolvida na *Arup*, através de *scripting*, permitiu a modelação da estrutura e dos elementos individuais que a constituem, sendo traduzidos em planos [Fig.67]. Estas formas e planos dificilmente seriam traduzidos com o recurso à Geometria Euclidiana. Atrás desse *software*, está um nível de raciocínio lógico e geométrico extremamente complexo.

Partindo de um retângulo, foram introduzidas as deformações que podem ser controladas parametricamente, permitindo a qualquer altura serem ajustadas [Fig.68]. Este retângulo é subdividido numa grelha que acompanha a deformação imposta. A maioria das peças são formadas por dois pinos nas extremidades e um encaixe no meio, que pode acomodar

um robô de 5 eixos, com capacidade de mudar mecanicamente de ferramenta” (Menges, 2006:76).

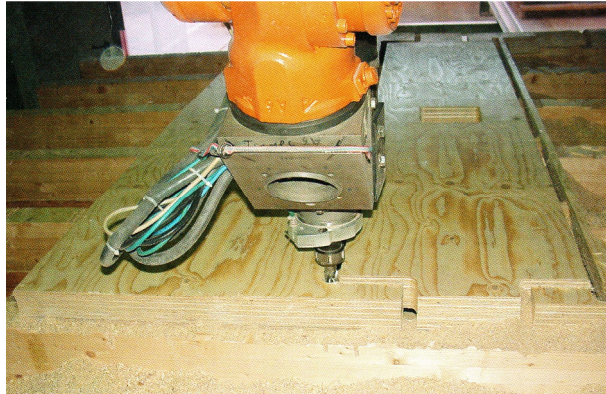


Figura 71
Fabricação das peças com o Robô, Serpentine Pavilion (2005)

“O corte das 427 peças demorou apenas duas semanas, e dispensou a impressão de desenhos” (TRADA.net). As peças que formavam o vão eram compostas por seções profundas madeira 550 mm de altura e 69 mm de espessura, segundo Nevile (2005:126). Essa espessura e profundidade proporcionaram um sombreamento natural ao espaço interior.



Figura 72
Perfis de madeira identificados

As aberturas foram preenchidas com *“248 painéis de policarbonato semi-translúcidos de 5 milímetros de espessura”* (Nevile, 2005,126). Estes painéis eram de formato único e tiveram de ser cortados com máquina de corte CNC, mas não necessariamente por um robô, por serem peças finas e pequenas.

Uma vez no local de implantação, as peças foram montadas manualmente, ou com recurso a equipamento mecânico leve. À medida que se montava, *“fixavam-se as peças com um parafuso, a fim de evitar o colapso parcial ou total por efeito dominó, esta foi uma medida de precaução”* (TRADA.net), apesar de a estrutura se tornar autoportante quando completa.



Com “400 metros quadrados foi maior que os antecessores, medindo aproximadamente 25m x 15m em planta e 3 metros até o máximo de 5,5 metros do chão”. (Nevile, 2005:126), formando um vão livre de 17 metros sem apoios.

Figura 73

(esquerda) Montagem dos elementos laterais, verticais

Figura 74

(cima) Montagem das peças intermédias da cobertura.

Resultado

Os constrangimentos e imposições que surgiram, antes ou no decorrer de um projeto, obrigaram, por vezes, a soluções engenhosas e invulgares. Este pavilhão é um bom exemplo disso, principalmente, devido ao conhecimento antecipado das capacidades técnicas e operativas das equipas envolvidas, uma vez que já tinham existido trabalhos colaborativos entre a equipa de arquitetos e a de engenheiros. Siza e Souto Moura já tinham colaborado com *Balmond* e a *Arup* em projetos como o Museu de arte contemporânea em Helsínquia [1992-93] *Pavilhão de Portugal, para Expo 98 em Lisboa e Expo 2000 em Hanover e um estádio nunca realizado, em Palermo* (Siza, Moura, Obrist, 2005:102).

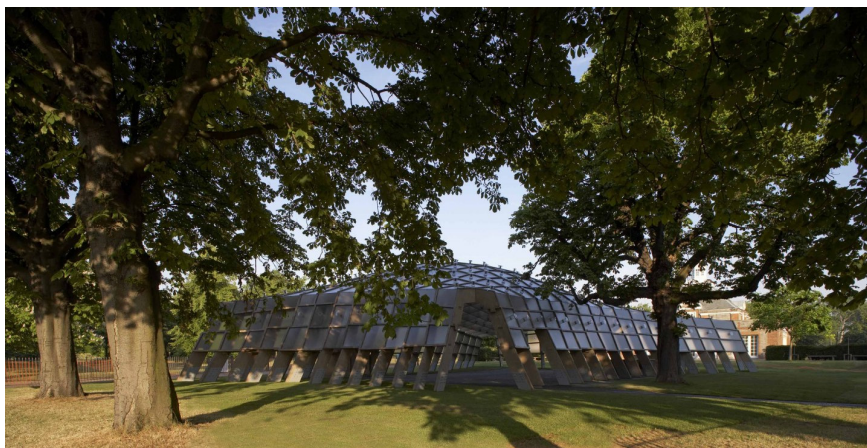


Figura 75

Vista, Serpentine Pavilion (2005)

A solução que os arquitetos e engenheiros encontraram, para responder aos desafios e condicionantes do projeto, resultaram em uma engenhosa estrutura de madeira, que sendo formada por múltiplas peças de tamanho limitado, facilitaram o transporte e montagem, sem recurso a equipamento pesado. Além disso, facilitou a transferência do pavilhão para o local definido pelo comprador da estrutura, após o período para o qual foi concebido.



Figura 76
Serpentine Pavilion (2005)

Outro fator importante neste projeto é a forma como as novas tecnologias facilitam todo este processo. Este projeto foi desenvolvido em quatro locais distintos: Londres (UK), Porto, Finlândia, Aichach (Alemanha). Na comunicação entre os arquitetos e engenheiros, sabemos que “*Souto Moura visitou a Arup em Londres apenas três vezes, e Siza encontrou-se com Balmond no Porto, sendo as restantes comunicações efetuadas por fax, telefone ou correio eletrónico* (Siza, Moura, Obrist, 2005:86).

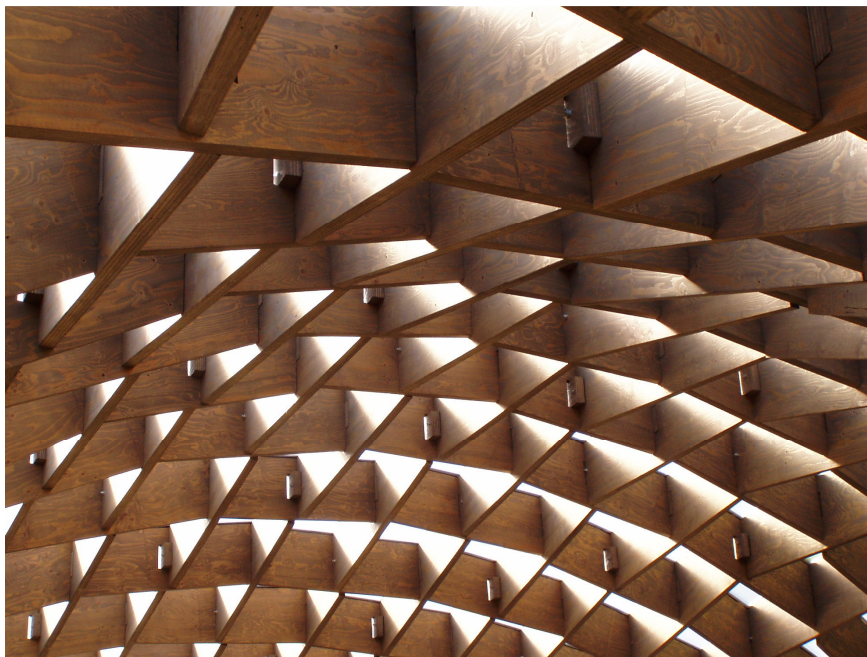


Figura 77
Vista do teto, Serpentine
Pavilion (2005)

É também importante realçar a rapidez com que tudo decorreu, apesar de não ter sido uma produção estandardizada, dando provas de como a *personalização*, não tem necessariamente de ser mais demorada.



Figura 78
Vista da cobertura com a
iluminação solar,
Serpentine Pavilion (2005)

4.2.2. ICD/ITKE Research Pavilion (2010)

Em 2010, o *Institute for Computational Design* (ICD) e o *Institute of Building Structures and Structural Design* (ITKE), reuniram uma equipa multidisciplinar, com a intenção inicial de desenvolver uma investigação sobre estruturas de flexão-ativa, explorando o seu potencial arquitetónico através do desenho digital. Os resultados seriam usados para a conceção e materialização de um pavilhão à escala humana, que teve por base de desenho, dois pontos essenciais. “*A integração de pele e estrutura em um material único, sistema de curva-ativa sem a necessidade de outros elementos de construção e, em segundo lugar, estudar o comportamento à flexão elástica, definindo uma série de componentes comportamentais que medeiam espacialmente uma rede intrincada de forças*” (Fleischmann, Knippers, Lienhard, Menges and Schleicher, 2012:46).



Figura79
ICD/ITKE Research
Pavilion 2010

Ficha técnica

Projeto: ICD/ITKE Research Pavilion 2010
Cliente: ICD Institute for Computational Design (Stuttgart University)– Prof. Achim Menges
 ITKE Institute of Building Structures and Structural Design (Stuttgart University) – Prof. Jan Knippers.

Arquitetos (conceito):

Andreas Eisenhardt
 Manuel Vollrath
 Kristine Waechter& Thomas Irowetz
 Oliver David Krieg
 Admir Mahmutovic
 Peter Meschendoerfer
 Leopold Moehler
 Michael Pelzer
 Konrad Zerbe

Desenvolvimento Científico e Gestão de Projeto**Institute for Computational Design**

Prof. Achim Menges
 Moritz Fleischmann (Gestor de Projeto)
 Christopher Robeller (Pormenor/ Gestão de Construção)
 Karola Diericghs (Documentação)

Prof. Jan Knippers**Institute of Building Structures and Structural Design**

Simon Schleicher (Gestor de Projeto)
 Julian Lienhard (Engenheiro Estrutural)
 Diana Da Souza (Engenheira Estrutural)

Robô:

KUKA Roboter GmbH – Robô de 6 eixos

Conceção

Com um diâmetro aproximado de 12 metros, foi construído usando “*folhas de contraplacado de bétula fina com apenas 6,5 milímetros de espessura*” (Fleischmann, et al., 2012:50). A exploração do desenho, partiu de uma profunda análise do material, através de testes às suas propriedades físicas e mecânicas.

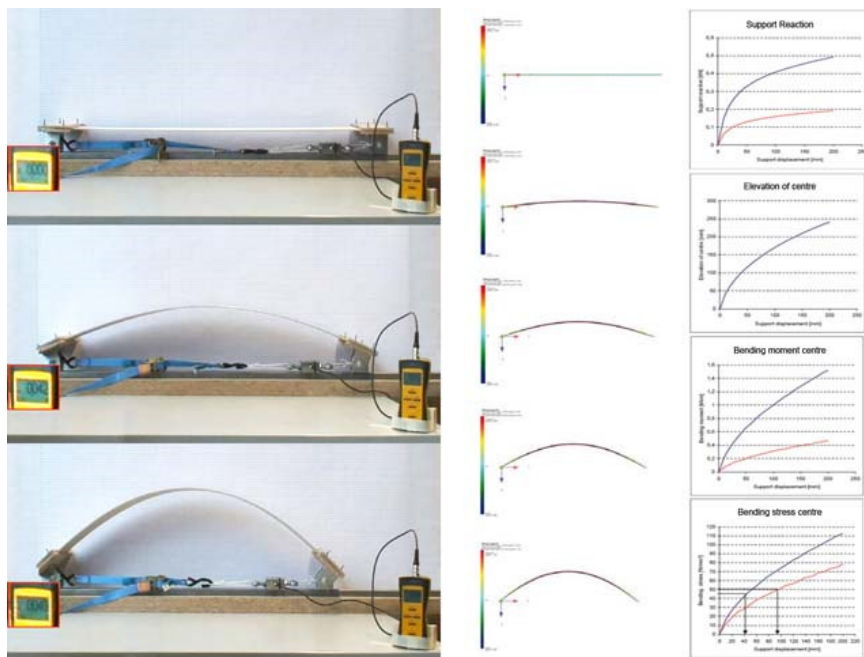


Figura 80
Simulações à elasticidade
do contraplacado

O modelo de design computacional, baseou-se na incorporação das características comportamentais relevantes do material, posteriormente traduzidas para princípios paramétricos.

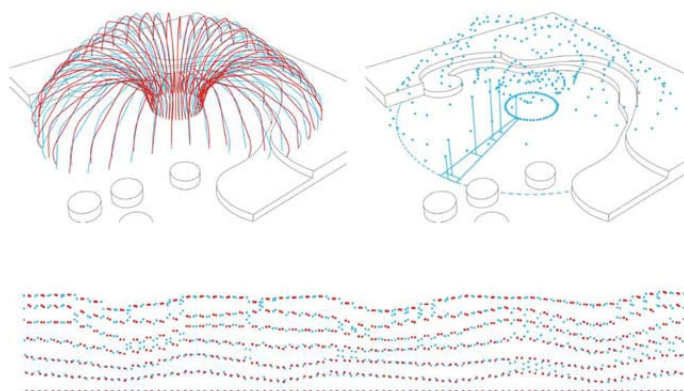


Figura 81
Simulações do modelo de
design computacional

Essas correlações paramétricas foram definidas através de um grande número de experiências físicas, focadas na medição dos desvios de tiras finas de laminado, elasticamente curvadas. *“As conexões à tira adjacente, alternam ao longo da tira, ditadas pela força que está concentrada localmente em cada região da tira dobrada, e mantida pela região tencionada da tira correspondente adjacente, aumentando significativamente a rigidez estrutural do sistema auto-equilibrante”* (Fleischmann, et al., 2012:47).

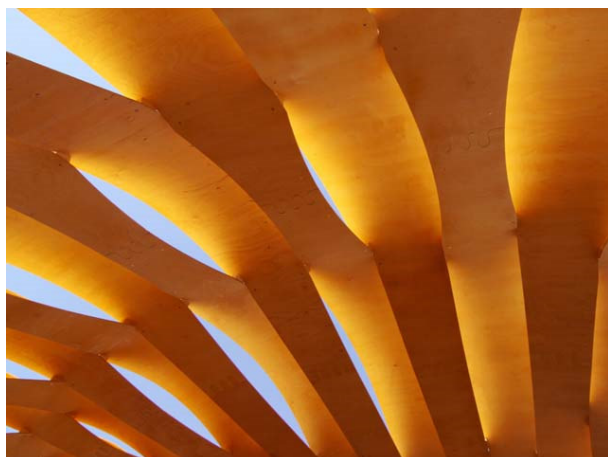


Figura 82
Pormenor das tiras de
contraplacado de bétula

O desenho da estrutura e de cada peça que a compõe, é inteiramente baseado no comportamento de “*flexão elástica do contraplacado de bétula*” (Fleischmann, et al., 2012:47), tendo em vista o posterior corte com recurso à robótica e a montagem manual, formando, no final, uma cobertura auto-portante com peças que se interligavam, e com aberturas por onde penetrava a luz natural.

A articulação entre a tira elástica e a base estrutural, foi um dos detalhes críticos que enfrentaram. A solução passou pelo reforço com parafusos (ibidem).

O desenvolvimento do projeto resultou no processamento de “500 peças de geometria única, com apenas três tipos de detalhes de conexão em cerca de 1.500 diferentes localizações em ângulo” (Fleischmann, et al., 2012:50).

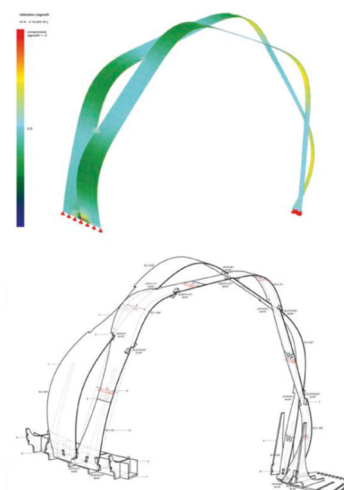
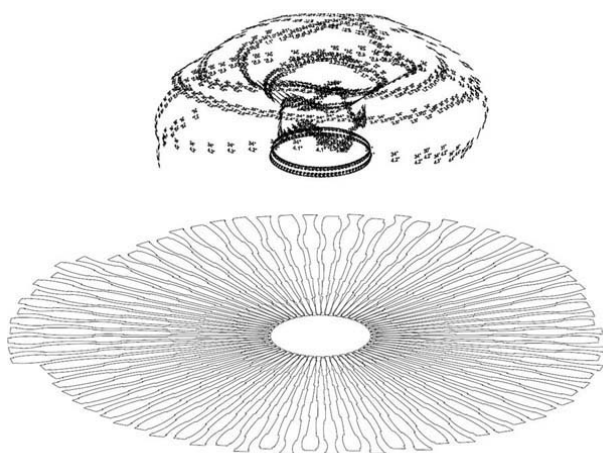


Figura 83
(cima) Simulações do
modelo de desenhodigital
das tiras

Figura 84
(esquerda) Ilustração das
tiras rebatidas e dos pontos
de interceção

As características materiais e a forma como as tiras se suportam mutuamente, quase sem a necessidade de fixações auxiliares, faz com que este sistema seja muito leve e, por isso, vulnerável à ação do vento. Desta forma, foi necessário criar e testar um modelo digital de análise estrutural. O “*modelo de análise estrutural da forma permitiu a verificação da forma geométrica, incluindo a sua tensão residual, bem como a análise das deformações e os níveis de stress sob cargas de vento externas*” (Fleischmann, et al., 2012:50).

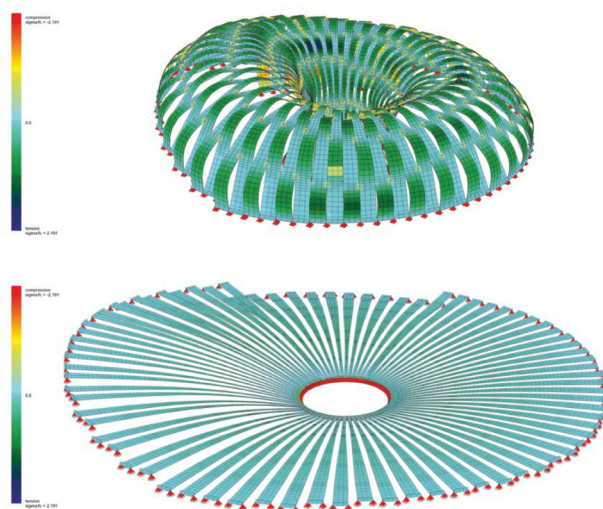


Figura 85
Simulações estruturais do
modelo, ICD/ITKE
Research Pavilion 2010

Materialização

O fabrico de “mais de 500 peças únicas” incluindo as 80 tiras, foram cortadas com o recurso a um “robô industrial de 6 eixos (Fleischmann, et al., 2012:47), seguido pela simulação da dobragem elástica e subsequente acoplamento manual das tiras, gerou a forma final do pavilhão, com reduzida fixação auxiliar.



Figura 86
Robô industrial de 6 eixos a fabricar as tiras

Cortadas as peças, decorreu o processo de montagem, que, segundo os autores, *“foi simples e rápido de executar, sem necessidade de grandes andaimes ou equipamentos adicionais, como as tiras planas simplesmente precisavam ser conectadas, encontrando automaticamente a sua forma específica. Em outras palavras, no local, o comportamento do material determina a forma do pavilhão.”* (Fleischmann, et al., 2012:50). O pavilhão resulta numa galeria, onde a experiência da luz, que penetra entre as finas tiras de contraplacado de bétula, concebendo um ambiente único.



Figura 87
Montagem manual do pavilhão, ICD/ITKE Research Pavilion 2010

Resultado

Como é possível observar, o pavilhão tem como objetivo a exploração do material na sua componente física e mecânica. O material é, quase estruturalmente, auto-suficiente devido à forma como se interligam as tiras, com uma percentagem muito reduzida de outros sistemas de fixação. Neste caso, as características e comportamento mecânico do material foi determinante para o desenvolvimento da arquitetura.

Quando a arquitetura se separa da engenharia, corre-se o risco de se desprender de um estudo mais aprofundado da mecânica que os materiais oferecem e que podem ser matéria de desenho da arquitetura. Não sendo estes apenas selecionados pelas características estéticas, ou porque garantem a estabilidade da estrutura projetada. Este projeto não seria possível sem a compreensão das propriedades mecânicas do material.



Figura 88
Vista interior, ICD/ITKE
Research Pavilion 2010

A forma deste pavilhão foi determinada pelo jogo de forças a que o material estava sujeito. No entanto, na arquitetura, os processos de design digital raramente são capazes de refletir essas relações. Nos processos de design computacional, o material e mecânica são normalmente tratados como entidades separadas. No entanto, neste projeto, a arquitetura emerge através do desenho digital gerado a partir das propriedades mecânicas do material.

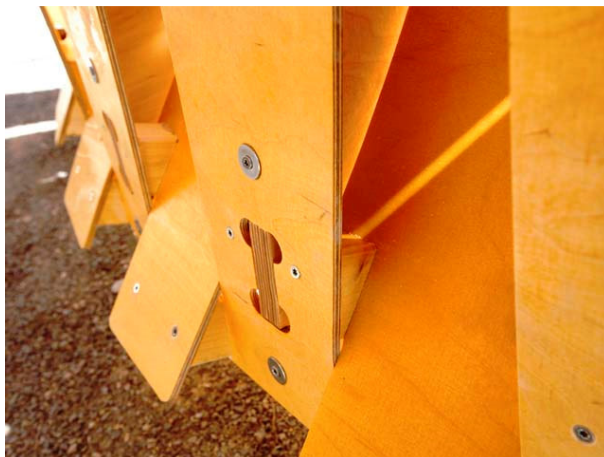


Figura 89
Detalhe da fixação ao chão

“Enquanto a maior parte dos projetos arquitetônicos se aproxima de um esquema concebido, desenhado, ou mesmo modelado digitalmente, gerado como uma construção de peças geometricamente descritas, inertes. Nos desenhos através de elementos materiais computacionais, estes podem ser definidos pelo comportamento ao invés da forma” (Fleischmann, et al., 2012:45)⁴⁹.



Figura 90
Vista aérea do pavilhão terminado

⁴⁹“While in most architectural design approaches a scheme is conceived and drawn, modelled or even digitally generated as a construct of geometrically described, inert parts, in computational design material elements can be defined by behaviour rather than shape.”

4.2.3. Análise

Através destes dois casos de estudo com semelhança material, mas muito distintos na abordagem de conceção, podemos concluir que a robótica veio incentivar uma maior reflexão sobre o material com que se trabalha, procurando ir mais além da estética e resistência mecânica do material. Enquanto que na *Serpentine pavilion de 2005* o material foi selecionado principalmente pela sua característica visual, no pavilhão *ICD/ITKE* de 2010 iniciou-se um profundo estudo das propriedades mecânicas do laminado e o conhecimento da capacidade de fabrico do braço robótico. Um processo quase oposto ao primeiro projeto que segue um processo bastante clássico, de projeto à execução.

4.3. Processos Formativos

Vivemos rodeados de objetos obtidos através de processos formativos, com diversos materiais e a várias escalas. Desde partes de telemóveis, objetos de escritório, utensílios, mobiliário, peças de automóvel, caixilhos, alvenaria, a estruturas em betão. A grande maioria são produtos de produção em massa.

Estes processos consistem na manipulação do material sem adição ou desperdício e oferecem a vantagem da deformação de materiais, em vários estados físicos. O material no estado líquido é, geralmente, manipulado com recurso a moldes ou por extrusão, no estado plástico, por modelagem e no estado sólido, por impacto físico, estampa ou por quinagem. Além destes, existem outros métodos, mas que não são tão utilizados.

A utilização da robótica nestes processos está maioritariamente concentrada na produção de moldes através do processo de subtração e adição, no entanto, há algumas exceções, como os casos de estudo apresentados em seguida.

4.3.1. Smart Dynamic Casting (2012)

Na construção *in situ* é muito frequente a obtenção de formas através da produção de moldes ou cofragem, que gera desperdício de material, que, por vezes, não é reutilizável. Este processo visa, especificamente, eliminar a necessidade de cofragem para a construção de colunas de betão, com um perfil que pode ser controlado através de desenho digital. Segundo os autores, o projeto é realizado por uma equipa de pesquisa interdisciplinar com especialistas do departamento de engenharia civil e ciências de materiais de construção (GRAMAZIO, KOHOLER.net).

Este projeto, embora muito conceptual, foi iniciado com propósitos muito concretos desde o início. Segundo os autores, o objetivo deste projeto centra-se sobre os processos de formação de materiais de direção. Com a ambição de uma maior compreensão do comportamento do material, para extrair desta experiência a informação que vai caracterizar as capacidades de conceção e de fabricação digital deste tipo de colunas. (Gramazio, Kohler, & Willmann, 2014:414).

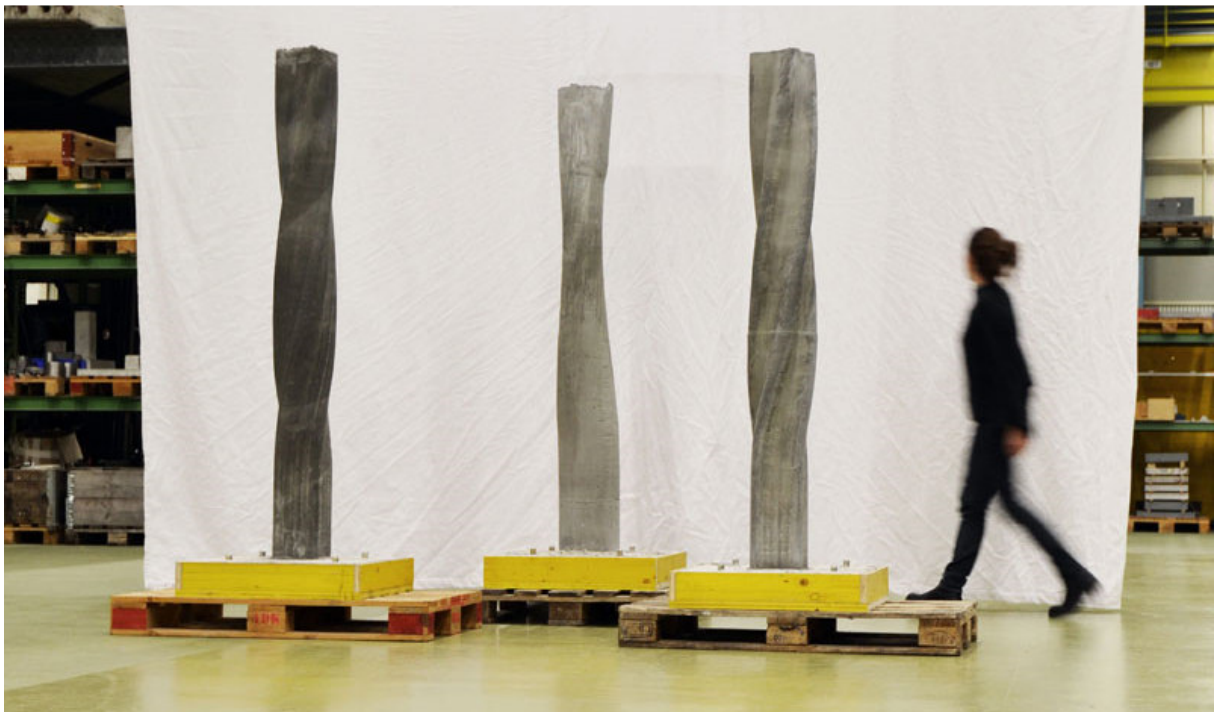


Figura91
Smart Dynamic Casting,
ETH Zürich , 2012-2015

Ficha técnica

Projeto:	Smart Dynamic Casting (2012) Gramazio Kohler Research, ETH Zurich
Cliente:	ETH Zurich
Colaboradores:	Dr. Robert J. Flatt (PI) Amir R. Shahab (PhD) Prof. Hans J Hermann Linus Mettler (PhD) Dep. of Civil, Environmental and Geomatic Engineering (D-BAUG), Institute for Building Materials (IfB)
Robô:	KUKA KR 150 L110 on linear track

Conceção

Iniciado com o processo das impressoras 3-D como princípio, o robô deposita continuamente betão, altamente fluido, deslizando a “*slipform*” (forma) verticalmente para cima [Fig.93], numa velocidade que permita a cura do betão (Gramazio, Kohler, & Willmann, 2014:412).

A trajetória e a rotação do braço robótico determinam a articulação geométrica da forma, gerando a geometria vertical desejada [Fig.94]. Além disso, também a forma determina o perfil da coluna, porque pode ter vários compressores laterais que determinam o perfil da coluna enquanto a forma sobe, produzindo um perfil variável na espessura e forma.

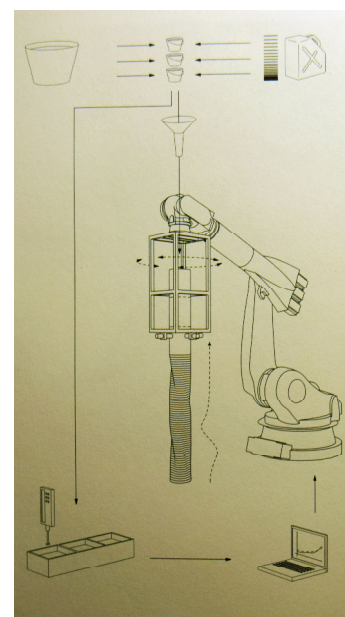
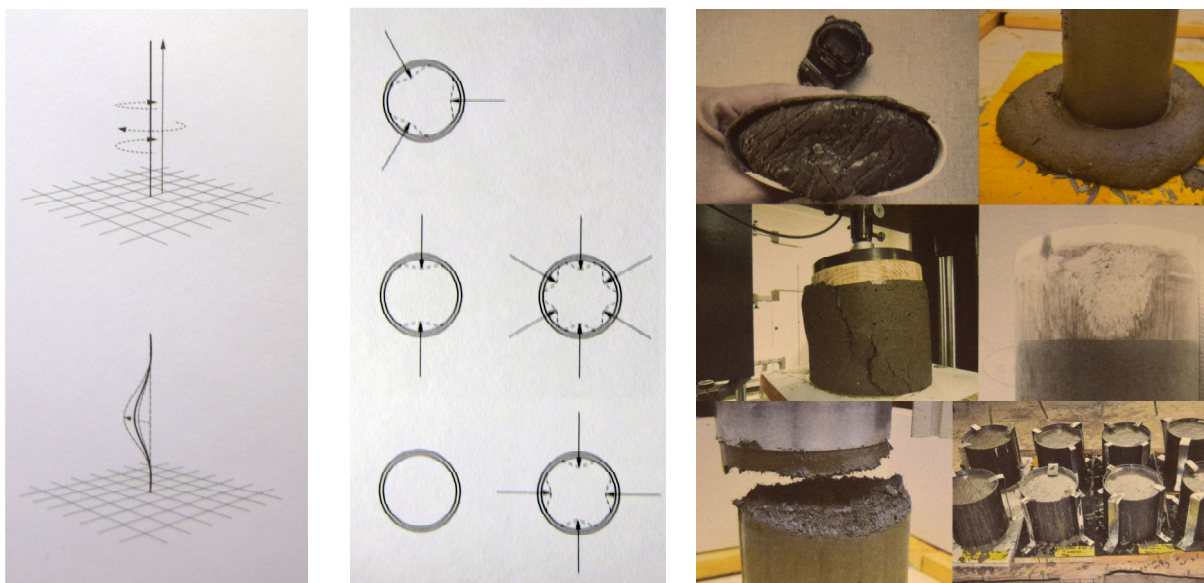


Figura 92
Ilustração do processo do SmartDynamic Casting, ETH Zürich, 2012-2015

Figura 93(esquerda)
Diagrama do movimento

Figura 94(centro)
Perfil da forma)

Figura 95(direita)
Testes de betão



Materialização

Após várias experiências, os autores concluíram que a velocidade do movimento da forma é crucial para a realização do projeto, para tal, tiveram de desenvolver e instalar um sensor que mediria a cura do betão e informaria o robô da velocidade (Gramazio, Kohler, & Willmann, 2014:416).

O robô adota uma velocidade média de dois centímetros por minuto, relativa ao tempo de cura (Gramazio, Kohler, & Willmann, 2014:412). Esta velocidade permitiu a execução da coluna até os dois metros de altura com uma rotação contínua de 180°.



Figura 96
Coluna em produção pelo robô que desliza a forma verticalmente

Resultado

Este caso de estudo apresenta uma abordagem distinta dos anteriores. Abordagem que se inicia, sobretudo, pelo interesse da investigação construtiva, explorando primeiro as capacidades construtivas da técnica e material, e só depois a sua aplicação.

Embora sejam apenas apresentados testes, este estudo de caso abre perspectivas sobre a sua aplicação na arquitetura, comprovando a possibilidade da execução deste processo formativo, sem recurso a moldes e evitando qualquer desperdício. Este processo não seria exequível sem recurso ao robô, por haver necessidade de um controle da velocidade, ao mesmo tempo que se controla a posição da forma.



Figura 97
Alguns resultados da
produção final, Smart
Dynamic Casting, ETH
Zürich, 2012-2015

4.3.2. RoboFold 'ARUM' (2012)

A dobragem é uma técnica milenar e encontra-se na construção, sob forma de painéis metálicos de revestimento e coberturas. Contudo, este estudo de caso mostra-nos que é possível explorar esta técnica através da robótica com grande precisão sem o recurso a moldes. Assim, além de desbloquear a rigidez natural dos processos tradicionais, oferece também a possibilidade de controlar os ângulos da dobragem com elevada precisão.

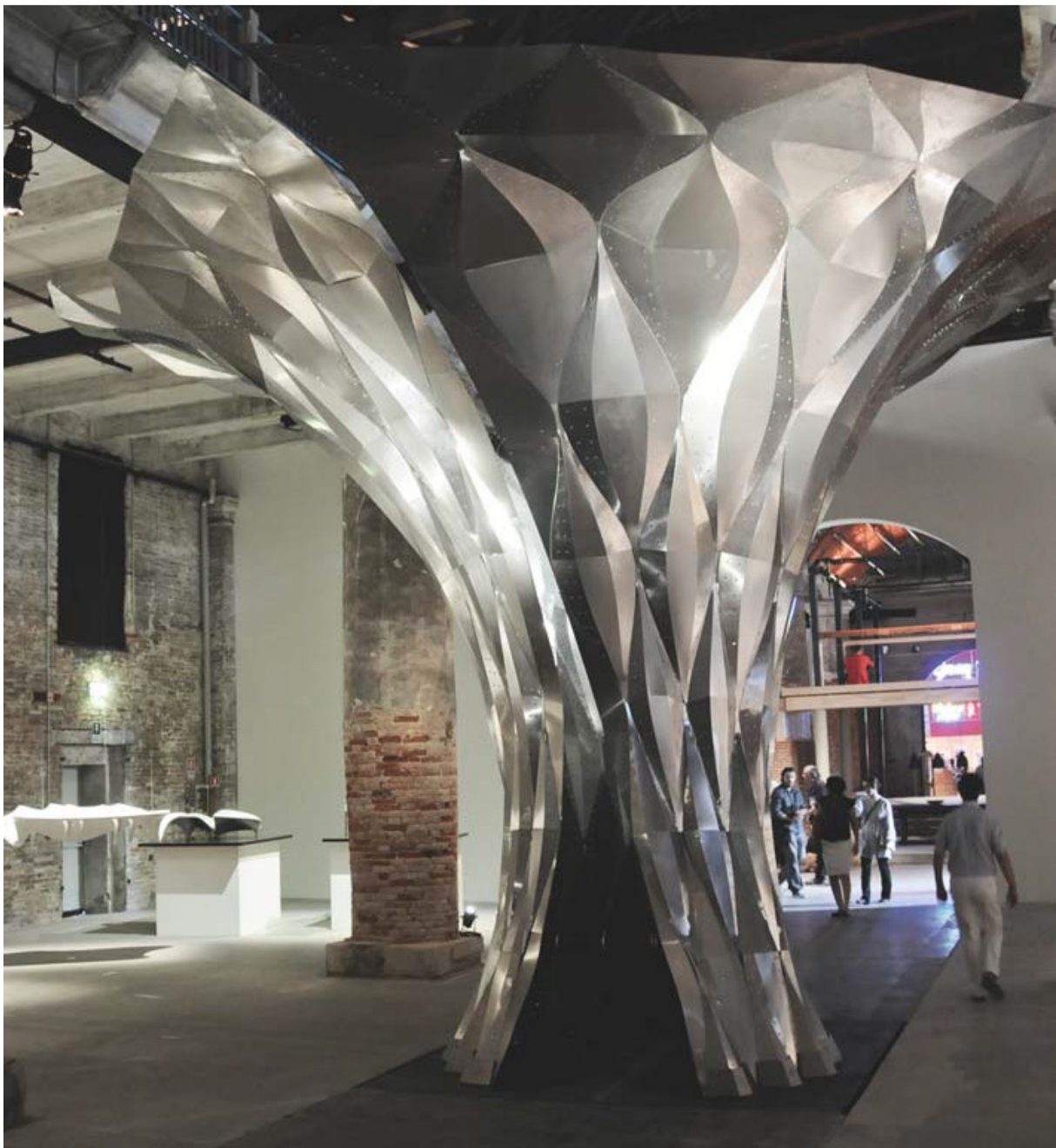


Figura 98
RoboFold 'ARUM'
Bienal de Veneza (2012)

Ficha técnica

Projeto:	RoboFold 'ARUM' La Bienal de Veneza (2012)
Arquitetos:	Zaha Hadid Architects, UK
Design:	Zaha Hadid com Patrick Schumacher, UK
Engenheiros estruturais:	Rasti Bartek, Bro Happold, UK
Material e tecnologia de fabrico:	Gregory Epps, RoboFOLD
Tecnologia:	DoisABB 6400

A escultura “Arum” foi produzida por *RoboFold*, em conjunto com Zaha Hadid Architects (ZHA), para o espaço expositivo de alguns dos trabalhos de Zaha Hadid Architects na Bienal de Veneza em 2012.

Esta instalação “foi uma resposta ao tema “*Common Ground*”, lançado por David Chipperfield como curador da Biennale de Veneza desse ano, pretendendo reafirmar a existência de uma cultura arquitetónica, composta não só de talentos singulares, mas de uma rica continuidade de ideias diversas unidas numa história comum” (BASULTO.net).

Conceção

Os arquitetos de Zaha Hadid Architects, inspiraram-se no “*Suprematismo Russo, ao prestar homenagem às linhagens históricas da pesquisa coletiva que levou às grandes obras de arquitetura contemporânea com a instalação “Arum”, presente na Bienal de Veneza de 2012*” (HADID.net). Para esta escultura, ZHA recorreram a *RoboFold* para criar uma nova estética com a utilização dessa técnica. A “*equipa de arquitetos rapidamente tomou consciência das possibilidades de uma tecnologia desenvolvida de raiz para integrar as características de fabricação no software de design e de controlo*” (Epps, 2014:68).

Uma área particular de pesquisa que ZHA pretendia explorar com esta instalação, era, o domínio da luz com conchas combinadas e estruturas em tensão. “*O estúdio já tinha projetado uma série de conchas complexas, bem como algumas estruturas em tensão. Aqui, pela primeira vez, esses dois mundos foram integrados, com a “concha” Arum, uma instalação feita de metal plissado*” (BASULTO.net).

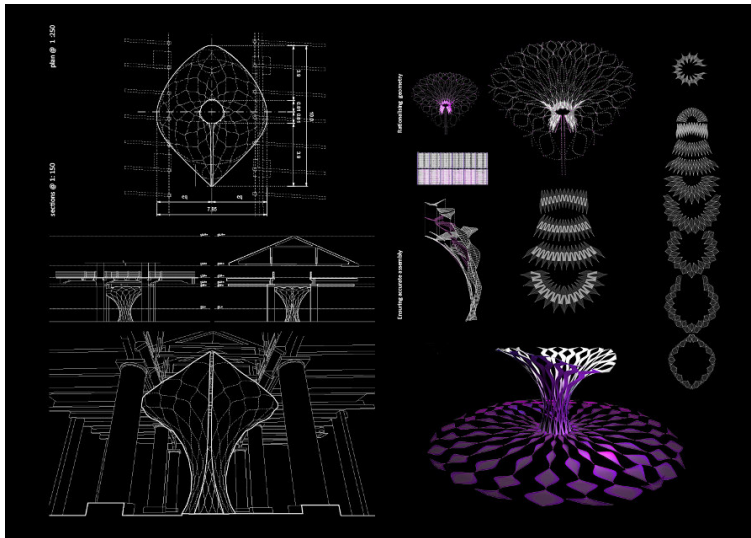


Figura 99
Conceção da escultura
ARUM

Este projeto desafiador necessitou de três meses de estudo e pesquisa em estúdio para gerar a geometria e as simulações digitais. Nas fases iniciais do projeto e antes de, roboticamente dobrar e instalar todos os 488 painéis curvos dobráveis e únicos, em metal plissado.

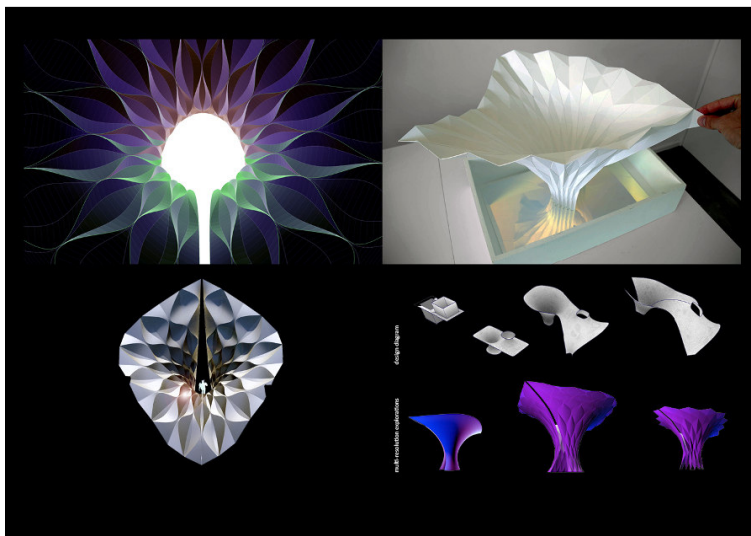


Figura 100
Ilustração virtual da
escultura ARUM

Materialização

A utilização da robótica permite dar forma a planos de alguns materiais deformáveis. A técnica utilizada exige uma grande cumplicidade entre a geometria e a resistência física do material. Uma grande vantagem desta técnica, no processo de concepção, é a facilidade com que podemos experimentar com uma simples folha de papel, embora sem a precisão que a robótica oferece. Esta técnica socorre-se de uma outra tecnologia de corte

CNC, para efetuar o corte das peças com o formato desejado e marcar os veios por onde a chapa vai dobrar.

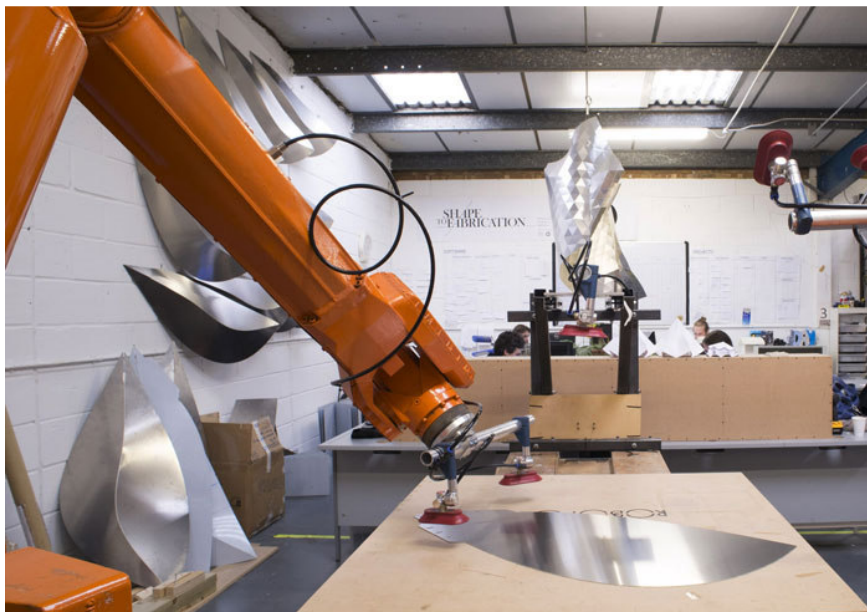


Figura 101
Preparação para a
dobragem da chapa pelo
robô, com duas ventosas.

Segundo Epps (2014: 69) a instalação foi concluída com 6 metros de altura e é composta por 488 painéis de alumínio. Cada painel foi dobrado pela ação de dois robôs de seis eixos cada. *“Executada de tal modo que traduz a um delicado toque humano numa folha de papel, segundo a ancestral técnica dos origamis”* (ibidem).



Figura 102
Montagem da escultura *in loco*



Figura 103
Dobragem de uma das peças
para a escultura ARUM

Resultado

Este projeto ilustra como é possível interligar uma vertente histórica baseada numa técnica milenar – a dobragem - com a tecnologia mais recente, para criar uma peça de aparência leve e elegante que enriquece a arquitetura, com a oferta de novas possibilidades materiais.

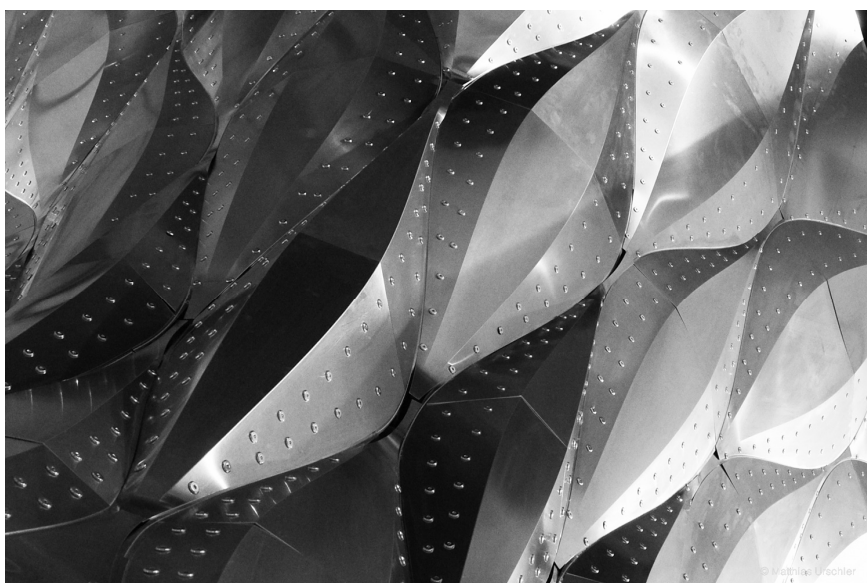


Figura 104
Detalhe da escultura ARUM

Este método também ilustra a forma como vários robôs podem colaborar juntos para atingir o mesmo fim. Neste caso verificamos que a aliança entre a colaboração e a precisão de sincronização no movimento e tempo, é imprescindível para a obtenção da forma desejada, de acordo com as propriedades materiais e limitações geométricas presentes neste projeto.



Figura 105
Panorâmica da exposição
RoboFold 'ARUM' *La Bienal*
de Veneza (2012)

A medição de forças exploradas entre o material e a cinemática robótica neste projeto, é muito subtil, dada a escolha de um material que minimiza esses constrangimentos. Contudo, importa realçar as capacidades desta técnica, a partir de um intrincado equilíbrio de forças, enquanto oferece a possibilidade de experimentação e controle sobre a peça que se trabalha.

Através de *RoboFold*, foram desenvolvidas e disponibilizadas ferramentas de software “*Godzilla e Mechagodzilla*” (Feringa, 2014:68),



Figura 106
Detalhe da RoboFold 'ARUM'

4.3.3. Análise

A grande variedade de materiais que podem ser manipulados sem adições ou subtrações encontra na robótica um campo inexplorado de alternativas aos processos implementados na indústria. Os casos de estudo apresentados, são um bom exemplo de como a robótica pode oferecer alternativas à produção em massa, sem significar custos elevados, pois dispensa os tradicionais moldes.

A fabricação robótica em arquitetura incentiva uma exploração material mais profunda e, conseqüentemente, uma maior reflexão sobre a aplicação do material de seleção, que por si, pode ter influência direta na arquitetura.

CONCLUSÃO

5.

5. CONCLUSÃO

A investigação de uma matéria de carácter tecnológico cuja evolução decorre aceleradamente à medida que se foi desenvolvendo este trabalho, enfrenta algumas dificuldades adicionais. Contudo, no fundamental, considera-se que os assuntos captados e discutidos são, no momento da entrega desta dissertação, representativos do estado da arte. Por outro lado, o facto de se ter verificado um crescimento na exploração da robótica na arquitetura também contribuiu para comprovar que esta tecnologia parece estar a ultrapassar a prova do tempo, demonstrando que este ressurgimento é mais estável e sustentado. Deste modo, pode-se concluir que a tecnologia robótica afirma-se como uma ferramenta útil e versátil ao serviço da arquitetura, no momento atual.

Com este trabalho foi possível verificar que a contribuição desta tecnologia vai muito além da capacidade de manipulação e transformação numérica de materiais. Quando combinada com software de desenho paramétrico contribui para expandir os limites da criatividade no projeto em arquitetura, uma vez que se constitui como potencial solução para a execução de formas complexas e/ou variáveis, que seriam de grande dificuldade de execução por outros processos convencionais.

Outro impacto desta tecnologia parece ocorrer nas relações entre os diferentes agentes em redor do projeto, dado que tende a estabelecer uma maior interatividade e sinergia na sua colaboração. Por este motivo, a ideia de que cada projeto representa um novo desafio parece ganhar uma nova expressão, uma vez que o arquiteto está mais permeável à interferência de colegas de outras disciplinas.

O crescimento da adesão à utilização de software de desenho paramétrico e de processos de fabricação digital, tendo em vista a investigação e resolução de problemas geométricos e materiais personalizados, tem gerado um campo fértil para a aparição de novas formas de organização e atuação dos arquitetos. Em torno da

robótica destacam-se as jovens empresas *Odico Formwork Robotics*, *RoboFold*, *Machineous*, *ROB Technologies* e *Greyshed*, que procuram partilhar o seu know-how com outros colegas da arquitetura e da construção. Esta realidade viabiliza modos de produção personalizados como alternativa aos processos baseados na standardização.

O futuro da aplicação robótica na construção *in loco* ainda é uma incerteza, pois existem muitos fatores complexos envolvidos na obra, que impedem uma progressão mais rápida a este nível. No entanto, a sua aplicação é perfeitamente viável em abordagens de prefabricação em ambiente controlado de laboratório ou fábrica, como foi possível verificar nos casos de estudo deste trabalho.

Sendo a arquitetura uma prática que opera a várias escalas, a tecnologia robótica pode desempenhar um papel importante na fabricação adaptada a essas escalas distintas, como podemos observar nos diferentes casos de estudo. Apesar do alcance limitado de um braço robótico, é possível desenvolver estratégias de desenho e produção baseadas na modulação prefabricada de modo a permitir a resolução de escalas maiores de construção. Esta possibilidade pode expandir os horizontes do desenvolvimento de novos modos de manipulação e aplicação material. Esta influência criativa pode ser potenciada pelo acesso cada vez mais facilitado e económico à robótica.

Como este trabalho procurou documentar, assiste-se, atualmente, a uma investigação bastante profunda sobre estas ferramentas na arquitetura, com uma ênfase na exploração das características dos materiais utilizados como potenciadores do próprio ato de projeto. Podemos afirmar que há um certo culto do material, algo que não é propriamente novo na história da disciplina, procurando enaltecer as suas qualidades visuais e mecânicas através do uso da tecnologia robótica.

Nos casos de estudo *ICD/ITKE Research Pavilion* (2012) e *CD/ITKE Research Pavilion* 2010 podemos observar como a escolha do material de trabalho, a fibra e o laminado, influenciaram na forma do pavilhão, denotando-se uma forte articulação entre o material e escolhas arquitetônicas. Além disso, percebe-se que ambos os casos de estudo, são construções efêmeras, respondendo a um programa muito simples.

De um modo mais genérico, pode-se dizer que estas possibilidades de manipulação e desenvolvimento de novos materiais ou aplicações, poderão ser exploradas para oferecer grandes benefícios para a redução do consumo de recursos energéticos e naturais, indo ao encontro da crescente preocupação com questões de aquecimento global.

Para além desta dimensão de inovação material, é também positiva a experiência espacial que certas estruturas nos proporcionam, oferecendo-nos um jogo de escalas, forma e luz, muito distintos do comum e habitual. Na base desta experiência, encontra-se um tipo de construção quase irreplicável sem a utilização de referidas ferramentas – o desenho paramétrico aliado à robótica e a processos de análise digital avançados. Este aspeto desperta diferentes sentimentos e emoções, assim como curiosidade e um certo encanto.

Para terminar, destaca-se a afirmação de Martin Bechthold, de que a *“fabricação robótica é o futuro, para complementar os métodos de construção convencionais e fabricação baseada no artesanato. Formões e robôs não se excluem mutuamente, cada um tem o seu lugar. Com os robôs a reentrar na construção é crucial para saber quando, e quando não os usar”* (2010:121).⁵⁰ Esta sua afirmação sublinha a importância de que a tecnologia robótica, para além de não ser impositiva de um estilo, não deve ser considerada como um

⁵⁰*“Robotic fabrication is the future, to complement conventional construction methods and craft-based fabrication. Chisels and robots do not exclude each other; they each have their place. As robot’s re-enter construction it is crucial to know when and when not to use them.”*

substituto de outras ferramentas ao dispor do arquiteto. Perante um mundo com vários desafios, o arquiteto deve ser capaz de escolher e orquestrar as tecnologias de desenho de fabricação disponíveis mais adequadas para apoiar o seu pensamento e a sua ação. O uso da tecnologia robótica não é um fim em si mesmo, mas pode ser um meio importante para viabilizar algumas dessas intervenções.

BIBLIOGRAFIA

1. AGKATHIDIS, 2010, Asterios, Digital manufacturing: In design and architecture, Amsterdam, BIS Publishers Amsterdam
2. BALAGUER, Carlos e ABDERRAHIM, Mohamed, 2008. *Robotics and Automation in Construction*, Croacia: In-Teh.
3. BASULTO, David, 2012. VeniceBiennale 2012: Arum /ZahaHadid, *ArchDaily*, disponível em: <http://www.archdaily.com/269061/venice-biennale-2012-arum-zaha-hadid> [consultado em 2015.10.01].
4. BEAUCÉ, Patrick e CACHE, Bernard (Objectile), 2005, Towards a Non-Standard Mode of Production, in LEUPEN, Bernard, Time-based architecture, Rotterdam: 010 Publ.
5. BECHTHOLD, Martin, 2010, The Return of the Future: A Second Go at Robotic Construction, *Architectural Design. Special Issue: The New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies*, 80 (4), pp. 116-121.
6. BOCK, Thomas e LANGENBERG, Silke, 2014 Changing Building Sites: Industrialisation and Automation of the Building Process, Made by Robots: Challenging architecture at a larger scale, *Architectural Design*, London: John Wiley & Sons, pp. 88-99.
7. BURRY, Mark, 2011, Scripting Cultures: *Architectural Design and Programming*, London: John Wiley & Sons
8. BURRY, Mark, 2012, The persistence of faith in the intangible model, Persistent Modelling: Extending the Role of Architectural Representation, Routledge, Oxon, pp.26-40
9. CACHE, Bernard, 1995, Earth Moves: The Furnishing of Territories, Cambridge, MIT press
10. CANEPARO, Luca, 2014. Digital fabrication in Architecture, Engineering and Construction, Dordrecht: Springer.
11. CORAY, Tanja, NCCR Digital Fabrication, disponível em <http://www.dfab.ch/achievements/the-in-situ-fabricator-an-autonomous-construction-robot/> [consultado em 2016.05.02].
12. COUSINEAU, Leslie e MIURA, Nobuyasu, 1998 *Construction Robots: The Search for New Building Technology in Japan*. Reston, USA: ASCE Publications.
13. ENGELBART, Douglas, 1962, Augmenting human intellect: A conceptual framework, disponível em

<http://www.doungengelbart.org/pubs/augment-3906.html#8>[consultado em 2016. 08.26].

14. EPPS, Gregory, 2014. RoboFold and Robots.IO, in GRAMAZIO, Fabio e KOHLER, Matthias (Guest-Editors), *Made by Robots: Challenging architecture at a larger scale*, *Architectural Design*, London: John Wiley & Sons, pp. 68-69.
15. FERINGA, Jelle, 2014. "The Simultaneity of Craft, Economics and Design," in GRAMAZIO, Fabio e KOHLER, Matthias (Guest-Editors), *Made by Robots: Challenging architecture at a larger scale*, *Architectural Design*, London: John Wiley & Sons, pp. 61-65.
16. FLEISCHMANN, Moritz, KNIPPERS, Jan, LIENHARD, Julian, MENGES, Achim, SCHLEICHER, Simon, 2012. "Material Behaviour: Embedding physical properties in computational design processes", in MENGES, Achim (Guest-Editor), *Material Computation*, *Architectural Design*, London: John Wiley & Sons, pp. 44-51.
17. FOSTER, Hal, 2002, *Design and Crime: And Other Diatribes*, Verso, London
18. FRAMPTON, Kenneth, 2003, *História Crítica da Arquitetura Moderna*. São Paulo: Martins Fontes
19. GANN, Richard G. et al. 1996. *Innovation in the Japanese construction industry: A 1995 Appraisal*. National Institute of Standards and Technology Special Publication 898.
20. GRAMAZIO, Fabio e KOHLER, Matthias, 2008. *Digital Materiality in Architecture*, Baden, Suíça: Lars Müller.
21. GRAMAZIO, Fabio e KOHLER, Matthias (Guest-Editors), 2014, *Made by Robots: Challenging architecture at a larger scale*, *Architectural Design*, London: John Wiley & Sons.
22. GRAMAZIO, Fabio, KOHLER, Matthias, WILLMANN, 2014. *The Robotic Touch: How Robots Change Architecture*, Zurich, Park Books.
23. GRAMAZIO, Fabio, KOHLER, Matthias, WILLMANN, 2014. Introduction "Authoring Robotic Processes", in GRAMAZIO, Fabio e KOHLER, Matthias (Guest-Editors), *Made by Robots: Challenging architecture at a larger scale*, *Architectural Design*, London: John Wiley & Sons, pp. 14-21.

24. GRAMAZIO, Fabio, KOHLER, Matthias, “SmartDynamic Casting” disponível em <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/223.html> [consultado em 2016. 09.25].
25. HADID, Zaha, 2012, Venice Architecture Biennale, Common Ground, <http://www.zaha-hadid.com/design/contribution-to-2012-venice-biennale-theme-%E2%80%98common-ground%E2%80%99/> [consultado em 2016. 05.15].
26. HOANG, Han, 2005. *Automated Construction Technologies: Analyses and Future Development Strategies*, Master Thesis submitted to the Department of Architecture in the Massachusetts Institute of Technology.
27. IWAMOTO, Lisa, 2009. *Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques*, New York: Princeton Architectural Press
28. JONES, Julia, 2005, Fast-Forward Architecture, “Serpentine Gallery Pavilion 2005 designed by “Álvaro Siza, Eduardo Souto Moura with Balmond-ARUP”, London, Riba, 24-41
29. KNIPPERS, J., La MAGNA, R., MENGES, A., REICHERT, S., SCHWINN, T. and WAIMER, F. (2015), ICD/ITKE Research Pavilion 2012: Coreless Filament Winding Based on the Morphological Principles of an Arthropod Exoskeleton. *Archit Design*, London: John Wiley & Sons 85: 48–53.
30. KLOFT, Harald, 2004 “Non-Standard structural design for non-standard architecture” em KOLAREVIC, Branko e MALKAWI, Ali M., 2004. *Performative architecture: Beyond instrumentality*. New York, U.S.A: Taylor & Francis,
31. KOLAREVIC, Branko, 2003. *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. New York: Spon Press
32. LIU, Yuchen 2009. *Robotic Design Construction: Digital Fabrication Strategies for Freeform Masonry Casting and Mobile Assembly*. Tese de mestrado em estudos de Arquitetura, Massachusetts Institute of Technology
33. LUSO, Eduarda, LOURENÇO, Paulo B., ALMEIDA, Manuela, 2004. Breve história da teoria da conservação e do restauro, *Engenharia Civil UM*, Nº. 20, pp. 31-44.
34. MARCUM, James, 2006, *After the Information Age: "A Dynamic Learning Manifesto"* Peter Lang, New York

35. MENGES, Achim, 2006. *Manufacturing diversity*, in HENSEL, Michael, MENGES, Achim + WEINSTOCK, Michael (Guest-Editor) *Techniques and Technologies in Morphogenetic Design, Architectural Design*, London: John Wiley & Sons, pp. 71-77.
36. MENGES, Achim, Achimmenges.net, disponível em <http://www.achimmenges.net> [consultado em 2015.09.30].
37. MENGES, Achim, 2012. Material Computation (introduction), Higher integration in morphogenetic design, in MENGES, Achim (Guest-Editor), *Material Computation, Architectural Design*, London: John Wiley & Sons, pp. 15-21.
38. MENGES, Achim e KNIPPERS, Jam, 2015. Fibrous Tectonics. *Architectural Design*, London: John Wiley & Sons 85: 40–47.
39. MENGES, Achim e SCHWIMM, Tobias, 2012. “Manufacturing reciprocities”, em MENGES, Achim (Guest-Editor), *Material Computation, Architectural Design*, London: John Wiley & Sons, pp. 119-125.
40. MIGAYROU, Frédéric (ed.), 2003. *Architectures Non Standard*, Paris, Éditions du Centre Pompidou.
41. MONKMAN, G. J., HESSE, S., STEINMANN, R., SCHUNK, H. 2007, *Robot Grippers*. John Wiley & Sons, Weinheim
42. NABONI, Roberto, PAOLETTI, Ingrid, 2015, *Advanced Customization in Architectural Design and Construction*, Springer, London
43. NEVILE, Harnish, 2005 “*Technical Description*”, LARNER, Melissa (ed.), *Technical description*, “Serpentine Gallery Pavilion 2005 designed by “Álvaro Siza, Eduardo Souto Moura with Balmond – ARUP”, London, Riba, 126.
44. NOF, Shimon Y, 1999 (2.ed.). *Handbook of Industrial Robotics* (segundaedição). John Wiley & Sons, New York.
45. NOF, Shimon, 2009, "Springer Handbook of Automation", Springer Berlin Heidelberg, Indiana, USA
46. OXMAN, Neri, 2010. Structuring Materiality: Design Fabrication of Heterogeneous Materials, *Architectural Design. Special Issue: The New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies*, 80 (4), pp.78-85.
47. PETERS, Teri. 2011. The Incredible Folding Man: Gregory Epps Designs by Folding With the Help of 6-Axis Industrial Robots, *Mark*, pp. 200-205.

48. PETERS, Brady, PETERS, Terry, 2013, Inside smartgeometry “expanding the architectural possibilities of Computational Design”, West Sussex:John Wiley & Sons, Ltd
49. PICON, Antoine, 2014. “Robots and Architecture: Experiments, Fiction, Epistemology” in GRAMAZIO, Fabio e KOHLER, Matthias (Guest-Editors), Made by Robots: Challenging architecture at a larger scale, *Architectural Design*, London: John Wiley & Sons, pp. 54-59.
50. ROSHEIM, Mark Elling, 2006.*Leonardo's Lost Robots*. Springer.
51. SIZA, Álvaro, MOURA, Eduardo Souto, OBRIST, Hans Ulrich, 2005, Fast-Forward Architecture, “Serpentine Gallery Pavilion 2005 designed by “Álvaro Siza, Eduardo Souto Moura with Balmond – ARUP”, London, Riba, 84-97.
52. SOAR, Rupert e ANDREEN, David, 2012 "The Role of Additive Manufacturing and Physiometric Computational Design for Digital Construction", em, MENGES, Achim (Guest-Editor), Material Computation, *Architectural Design*, London: John Wiley & Sons, pp. 126-138.
53. SOUSA, José Pedro. 2010. From Digital to Material: Rethinking Cork in Architecture Through The Use of CAD/CAM Technologies. Tese de doutoramento em Arquitetura, Instituto Superior Técnico de Lisboa
54. TRADA, em file:///C:/Users/Ze%20Campos/Downloads/Ad%20-%20Olympic%20brochure.pdf [consultado em 2016.05.23].
55. TSUKI, Noriko, 2006, “*Cecil Balmond*”, A + U Publishing Co, Tokyo.
56. WINFIELD, Alan, 2012. *Robots: a very short introduction*, Oxford, Oxford University Press
57. ZAKI, Mey, 2008, "The Legacy of Tutankhamun Art and History" MeyZaki Farid Atiya Press, Giza

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1**
Foto do autor (2005)
Pag.3
- Figura 2**
Foto do autor (2005)
Pag.3
- Figura 3**
Elaboração do autor (2016)
Pag.5
- Figura 4**
<http://www.skibbereeneagle.ie/architecture/wightwick-manor-wolverhampton/>
Consultado [26-09-2016]
Pag.13
- Figura 5**
<http://www.chess.com/blog/batgirl/more-on-chessic-surrealists>
Consultado [26-09-2016]
Pag.14
- Figura 6**
https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ASagrada_Familia-1929.jpg
Consultado [26-09-2016]
Pag.14
- Figura 7**
Foto do autor (2010)
Pag.15
- Figura 8**
<https://archipressone.files.wordpress.com/2012/09/archigramw.gif>
Consultado [26-09-2016]
Pag.15
- Figura 9**
https://en.wikipedia.org/wiki/Sydney_Opera_House#/media/File:Sydney_Opera_House_botanic_gardens_1.jpg
Consultado [26-09-2016]
Pag.17
- Figura 10**
www.gaudidesigner.com/uk/sagrada-familia-models-studio---photo-1917_598.html
Consultado [26-09-2016]
Pag.18
- Figura 11**
<http://raredelights.com/wp-content/uploads/2014/02/Guggenheim-Museum-Bilbao-in-Spain-1.jpg>
Consultado [26-09-2016]
Pag.21
- Figura 12**
<http://raredelights.com/splendid-guggenheim-museum-bilbao-spain/guggenheim-museum-bilbao-in-spain-3/>
Consultado [26-09-2016]
Pag.22
- Figura 13**
<http://www.gramaziokohler.com/web/e/projekte/24.html>
Consultado [26-09-2016]
Pag.24
- Figura 14**
(Zaki, 2008:58)
Pag.28
- Figura 15**
<http://beeldende-denker.blogspot.co.uk/2013/06/beforehand.html>
Consultado [26-09-2016]
Pag.29
- Figura 16**
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/c/cc/Rur_1st_ed_1920.jpg
Consultado [26-09-2016]
Pag.29
- Figura 17**
http://rraj.rsj-web.org/en_atcl/798
Consultado [26-09-2016]
Pag.30
- Figura 18**
<http://www.botmag.com/the-rise-and-fall-of-unimation-inc-story-of-robotics-innovation-triumph-that-changed-the-world/>
Consultado [26-09-2016]
Pag.30
- Figura 19**
<http://framework.latimes.com/2012/01/25/unimate-robot-at-the-biltmore/>
Consultado [26-09-2016]
Pag.31
- Figura 20**
(Bock e lanenberg, 2014:97)
Pag.34
- Figura 21**
(Bock e lanenberg, 2014:97)
Pag.34
- Figura 22**
(Cousineau & Miura,1998:5)
Pag.34
- Figura 23**
(Bock e lanenberg, 2014:98)
Pag.35
- Figura 24**
(Gramazio, Kohler, & Willmann, AD:2014:17)
Pag.36
- Figura 25**
<http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/142.html>
Consultado [26-09-2016]
Pag.37

Figura 26

Elaboração do autor (2016)
Pag.39

Figura 27

Elaboração própria e,
<http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-140>
Consultado [26-09-2016]
Pag.40

Figura 28

Foto do autor (2016)
Pag.41

Figura 29

<http://www.designboom.com/design/7xstool-by-tom-pawlofsky-tibor-weissmahr/>
Consultado [26-09-2016]
Pag.42

Figura 30

(Winfield, 2012:44)
Pag.45

Figura 31

<http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/forschung/e/0/0/0/198.html>
Consultado [26-09-2016]
Pag.46

Figura 32

<http://www.dfab.ch/achievements/the-in-situ-fabricator-an-autonomous-construction-robot/>
Consultado [26-09-2016]
Pag.47

Figura 33

<http://kalw.org/post/nummi-five-years-later-inside-tesla#stream/0>
Consultado [26-09-2016]
Pag.51

Figura 34

http://www.arh.bg.ac.rs/wp-content/uploads/2014/03/mTable_by_Gramazio_Kohler_big.jpg
Consultado [26-09-2016]
Pag.52

Figura 35

<http://www.robotsinarchitecture.org/map-of-creative-robots>
Consultado [26-09-2016]
Pag.53

Figura 36

(Burry, 2011:124)
Pag.54

Figura 37

<http://www.gramaziokohler.com/web/e/bauten/52.html>
Consultado [26-09-2016]
Pag.59

Figura 38

<http://www.gramaziokohler.com/web/e/bauten/52.html>
Consultado [26-09-2016]
Pag.60

Figura 39

<http://www.gramaziokohler.com/web/e/bauten/52.html>
Consultado [26-09-2016]
Pag.60

Figura 40

(Naboni&Paoletti, 2015:46)
Pag.61

Figura 41

<http://divisare.com/projects/260919-Gramazio-Kohler-Gantenbein-Vineyard-Facade>
Consultado [26-09-2016]
Pag.63

Figura 42

<http://divisae.com/projects/260919-Gramazio-Kohler-Gantenbein-Vineyard-Facade>
Consultado [26-09-2016]
Pag.63

Figura 43

http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/bilder/02_Web/036/060719_036_Baustelle_ML_082_WE.jpg
Consultado [26-09-2016]
Pag.63

Figura 44

Fonte:
<http://www.gramaziokohler.com/web/e/bauten/52.html>
Consultado [26-09-2016]
Pag.64

Figura 45

<http://www.gramaziokohler.com/web/e/bauten/52.html>
Consultado [26-09-2016]
Pag.65

Figura 46

<http://www.gramaziokohler.com/web/e/bauten/52.html>
Consultado [26-09-2016]
Pag.65

Figura 47

<http://www.gramaziokohler.com/web/e/bauten/52.html>
Consultado [26-09-2016]
Pag.66

Figura 48

<http://www.gramaziokohler.com/web/e/bauten/52.html>
Consultado [26-09-2016]
Pag.66

Figura 49

<http://www.achimmenges.net/?p=5561>
Consultado [26-09-2016]
Pag.67

Figura 50

<http://www.achimmenges.net/?p=5561>
Consultado [26-09-2016]
Pag.68

Figura 51

<http://www.achimmenges.net/?p=5561>
Consultado [26-09-2016]
Pag.69

Figura 52

<http://www.achimmenges.net/?p=5561>
Consultado [26-09-2016]
Pag.69

Figura 53

(Menges&Knippers, 2015:42)
Pag.70

Figura 54

(Menges&Knippers, 2015:45)
Pag.70

Figura 55

<http://www.achimmenges.net/?p=5561>
Consultado [26-09-2016]
Pag.71

Figura 56

<http://www.achimmenges.net/?p=5561>
Consultado [26-09-2016]
Pag.72

Figura 57

<http://www.achimmenges.net/?p=5561>
Consultado [26-09-2016]
Pag.73

Figura 58

<http://www.achimmenges.net/?p=5561>
Consultado [26-09-2016]
Pag.73

Figura 59

<http://www.achimmenges.net/?p=5561>
Consultado [26-09-2016]
Pag.74

Figura 60

<http://www.achimmenges.net/?p=5561>
Consultado [26-09-2016]
Pag.74

Figura 61

<http://www.achimmenges.net/?p=5713>
Consultado [26-09-2016]
Pag.75

Figura 62

Foto do autor (2016)
Pag.75

Figura 63

Foto do autor (2005)
Pag.77

Figura 64

(Siza, Moura, Obrist, 2005:84)
Pag.79

Figura 65

(Siza, Moura, Obrist, 2005:123)
Pag.79

Figura 66

(Siza, Moura, Obrist, 2005:83)
Pag.80

Figura 67

<http://www.woodworks.org/wp-content/uploads/e-wsf-2012-LAWRENCE-log-to-beam.pdf>
Consultado [26-09-2016]
Pag.80

Figura 68

(Tsuki, 2006: 29)
Pag.81

Figura 69

(Tsuki, 2006: 29)
Pag.81

Figura 70

(Tsuki, 2006: 29)
Pag.81

Figura 71

(Tsukui, 2006:30)
Pag.82

Figura 72

(Tsukui, 2006:31)
Pag.82

Figura 73

(Tsukui, 2006:31)
Pag.83

Figura 74

(Tsukui, 2006:30)
Pag.83

Figura 75

<http://www.serpentinegalleries.org/press/serpentine-gallery-pavilion-2005-designed-%C3%A1lvaro-siza-and-eduardo>
Consultado [26-09-2016]
Pag.83

Figura 76

<http://www.serpentinegalleries.org/press/serpentine-gallery-pavilion-2005-designed-%C3%A1lvaro-siza-and-eduardo>
Consultado [26-09-2016]
Pag.84

Figura 77

Foto do autor (2005)
Pag.85

Figura 78

Foto do autor (2005)
Pag.85

Figura 79

<http://www.achimmenges.net/?p=4443>
Consultado [26-09-2016]
Pag.86

Figura 80

(Fleischmann, et al., 2012:47).
Pag.88

Figura 81

(Fleischmann, et al., 2012:47).
Pag.88

Figura 82

<http://www.achimmenges.net/?p=4443>
Consultado [26-09-2016]
Pag.89

Figura 83

(Fleischmann, et al., 2012:49),
Consultado [26-09-2016]
Pag.89

Figura 84

<http://www.achimmenges.net/?p=4443>
Pag.89

Figura 85

<http://www.achimmenges.net/?p=4443>
Consultado [26-09-2016]
Pag.90

Figura 86

(Fleischmann, et al., 2012:48).
Pag.91

Figura 87

<http://www.achimmenges.net/?p=4443>
Consultado [26-09-2016]
Pag.91

Figura 88

<http://www.achimmenges.net/?p=4443>
Consultado [26-09-2016]
Pag.92

Figura 89

<http://www.achimmenges.net/?p=4443>
Consultado [26-09-2016]
Pag.93

Figura 90

<http://www.achimmenges.net/?p=4443>
Consultado [26-09-2016]
Pag.93

Figura 91

<http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/223.html>
Consultado [26-09-2016]
Pag.96

Figura 92

(Gramazio, Kohler, & Willmann, 2014:412)
Pag.97

Figura 93

(Gramazio, Kohler, & Willmann, 2014:415)
Pag.97

Figura 94

(Gramazio, Kohler, & Willmann, 2014:415)
Pag.97

Figura 95

(Gramazio, Kohler, & Willmann, 2014:416)
Pag.97

Figura 96

<http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/223.html>
Consultado [26-09-2016]
Pag.98

Figura 97

<http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/223.html>
Consultado [26-09-2016]
Pag.99

Figura 98

(Epps, 2014:69)
Pag.100

Figura 99

<http://www.zha-code-education.org/WHAT-we-did-summer-2012-Venice>
Consultado [26-09-2016]
Pag.102

Figura 100

<http://www.zha-code-education.org/WHAT-we-did-summer-2012-Venice>
Consultado [26-09-2016]
Pag.102

Figura 101

<http://www.zaha-hadid.com>
Consultado [26-09-2016]
Pag.103

Figura 102

<http://uk.archello.com/en/product/arum-sculpture>
Consultado [26-09-2016]
Pag.103

Figura 103

(Epps, 2014:68)
Pag.104

Figura 104

<http://uk.archello.com/en/product/arum-sculpture>
Consultado [26-09-2016]
Pag.104

Figura 105

<http://www.zaha-hadid.com/design/contribution-to-2012-venice-biennale-theme-%E2%80%98common-ground%E2%80%99/>
Consultado [26-09-2016]
Pag.105

Figura 106

<http://www.zaha-hadid.com/design/contribution-to-2012-venice-biennale-theme-%E2%80%98common-ground%E2%80%99/>
Consultado [26-09-2016]
Pag.1

